

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP05/050985

International filing date: 04 March 2005 (04.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE
Number: 10 2004 011 355.6
Filing date: 05 March 2004 (05.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 08 June 2005 (08.06.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen:

10 2004 011 355.6

Anmeldetag:

05. März 2004

Anmelder/Inhaber:

Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen/DE

Bezeichnung:

Verfahren zur Bestimmung der Phasenlage, Verfahren zur Bestimmung der Schichtdicke und Vorrichtungen zur Durchführung der Verfahren

IPC:

G 01 M, G 01 J, G 01 N

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 15. April 2005

Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag

Agurks

CZ 0106
5. März 2004
ME/HUE/NAS
20040142

CARL ZEISS SMT AG
Carl-Zeiss-Straße 22
73447 Oberkochen
Deutschland

**Verfahren zur Bestimmung der Phasenlage,
Verfahren zur Bestimmung der Schichtdicke und
Vorrichtungen zur Durchführung der Verfahren**

**Verfahren zur Bestimmung der Phasenlage,
Verfahren zur Bestimmung der Schichtdicke und
Vorrichtungen zur Durchführung der Verfahren**

Technisches Feld der Erfindung

Die Erfindung betrifft Verfahren zur Bestimmung der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich an der freien Grenzfläche eines Viellagensystems. Ferner betrifft die Erfindung Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem. Außerdem betrifft die Erfindung Vorrichtungen zur Durchführung dieser Verfahren.

Stand der Technik

Die Reflektivität von elektromagnetischer Strahlung an einem Viellagensystem hängt sowohl von der Wellenlänge λ ab, mit der die Oberfläche beaufschlagt wird, als auch von deren Einfallswinkel Φ gegenüber der Oberflächennormalen. Die Reflektivität $R(\lambda, \Phi)$ eines optischen Elementes ergibt sich dabei aus der Intensität der reflektierten Strahlung geteilt durch die Intensität der einfallenden Strahlung. Bei spektraler Auflösung wird die Reflektivität bei konstantem Einfallswinkel und variabler Wellenlänge gemessen. Bei Winkelauflösung wird die Reflektivität bei konstanter Wellenlänge λ gemessen und der Einfallswinkel Φ der Strahlung durchgestimmt.

Reflektometrische Messungen an Viellagensystemen für den extrem ultravioletten Wellenlängenbereich (EUV) und weichen Röntgenwellenlängenbereich (z. B. Wellenlängen von ca. 1 nm bis 20 nm) werden in der Regel mit Hilfe von Synchrotronstrahlungsquellen

oder laser- bzw. entladungserzeugten Plasmaquellen durchgeführt. Synchrotronstrahlung ist für reflektometrische Messungen sehr gut geeignet, denn Synchrotronstrahlung ist eine sehr brillante, „weiße“ Strahlung, d. h. sehr gut kollimierbar und sehr breitbandig. Darüberhinaus steht diese Strahlung kontaminationsfrei im Vakuum zur Verfügung.

Die polychromatische Strahlung eines Synchrotrons oder einer Plasmaquelle wird für den Einsatz in der Reflektometrie üblicherweise kollimiert und monochromatisiert. Die derartig präparierte Strahlung wird dann zu spektralen oder winkelabhängigen Messungen der Reflektivität genutzt. Als Photonendetektor für die reflektierte Strahlung kann z. B. eine Photodiode verwendet werden. Die Intensitäten werden in der Regel seriell gemessen, d.h. die Messungen bestehen in einer zeitlichen Folge von Parameteränderungen und Photonenintensitätsmessungen. Typischerweise erfolgt an allen Strahlungsquellen eine Referenzmessung zur Bestimmung der Intensität der einfallenden Strahlung.

Reflektometrische Untersuchungen an auf Viellagensystemen basierenden reflektiven optischen Elementen erfassen zwar einige für deren Einsatz in der EUV-Lithographie wichtige Eigenschaften, wie z. B. den maximalen Reflexionsgrad, die Wellenlänge, bei der die maximale Reflektivität erreicht wird, und die Bandbreite der Reflexionskurve, wobei beispielsweise aus der Wellenlänge der maximalen Reflektivität auf die Einhaltung der Gesamtschichtdickenspezifikation geschlossen werden kann. Ein großer Nachteil besteht aber darin, dass stets nur über alle Einzellagen gemittelte Eigenschaften bestimmbar sind.

In der Vergangenheit wurde vorgeschlagen, die Struktur der Lagen eines Viellagensystems, d.h. der Dichte der Lagen, und insbesondere

die Rauigkeit an den Lagengrenzflächen zu bestimmen, indem gleichzeitig an einer Probe sowohl die Reflektivität als auch der in der Probe fließende Strom gemessen wird. Dazu wird Strahlung im Röntgenbereich verwendet. Dieser Vorschlag basiert auf der Annahme, dass das Spektrum des Strom normiert auf die Strahlungsdosis proportional dem Spektrum der stehenden Röntgenwelle ist, und die Gestalt des Spektrums von Lagenstruktur und Grenzflächenrauhigkeit abhängt. In einer entsprechenden Messvorrichtung wird mit Hilfe eines Monochromators monochromatisiertes Licht im Bereich um 100 eV zur Verfügung gestellt. Dieses wird auf eine Probe gelenkt, die einen Rotationsfreiheitsgrad zur Änderung des Einfallswinkels hat. Zur Messung der Reflektivität werden typischerweise Photodioden verwendet. Zur Messung der Strahlungsdosis wird ein Netz verwendet, das sich im Strahlengang zwischen Monochromator und Probe befindet und mit der Probe leitend verbunden ist. Zur Messung des in der Probe fließenden Stroms ist das Viellagensystem über ein Kabel mit einem Amperemeter verbunden.

Ferner wurde in der Vergangenheit vorgeschlagen, Defekte an reflektiven Optiken aus Vielschichtsystemen ortsaufgelöst zu detektieren, indem im stehenden Wellenfeld z.B. Photoelektronen gemessen werden. Lokale Abweichungen der Intensität des Photoelektronensignals von der an defektfreien Bereichen maximal erreichbaren Intensität werden als Hinweis auf einen lokalen Defekt gedeutet. Dazu wird die Oberfläche des Vielschichtsystems mit Strahlung konstanter Wellenlänge abgerastert. Auf ähnliche Art und Weise werden auch die durch Wärmelast hervorgerufenen Deformationen an Spiegeln eines EUV-Beleuchtungssystems bestimmt, indem der Photoelektronenstrom am jeweiligen Spiegel gemessen wird

Bereits bekannt ist auch das Photoelektronensignal an optischen Elementen, die in evakuierten, eine Restgasatmosphäre aufweisenden geschlossenen Systemen angeordnet sind, zu nutzen, um zur Vermeidung von Kontamination die Gaszusammensetzung der Restgasatmosphäre zu regulieren.

In einem röntgenoptischen System kann die Kontamination von optischen Elementen dadurch ermittelt werden, indem man die Photoelektronen an dem jeweiligen optischen Element misst und ihr Energiespektrum aufnimmt. Aus der Intensität bei gewissen Photonenelektronenenergien kann auf Kontamination geschlossen werden.

Bereits früher war schon grundsätzlich die gleichzeitige Messung von Reflektivität und Photoelektronenstrom zur Charakterisierung von Viellagensystemen vorgeschlagen worden unter der Annahme, dass die Phasenverschiebung zwischen Reflektivität und Photoelektronenstrom allgemein $\pi/2$ beträgt.

Bereits bekannt ist ein Verfahren zum Feststellen und, falls vorhanden, zur Dickenbestimmung von Kontamination auf einer fest vorgegebenen Unterlage. Dabei wird zunächst die Unterlagen ortsaufgelöst mit ausreichend energetischer polychromatischer Strahlung bestrahlt und anschließend der aus der Unterlage austretende Photoelektronenstrom bestimmt. Es wird ultraviolette Strahlung zur Charakterisierung benutzt. Die Messung beschränkt sich auf die zu detektierende Kontamination, eine Charakterisierung der Unterlage erfolgt nicht.

Kurze Beschreibung der Erfindung

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein Verfahren zur experimentellen Bestimmung der Phasenlage der stehenden Welle an

der freien Grenzfläche eines Viellagensystems sowie zur Bestimmung von Schichtdicken und eine dazu geeignete Anordnung zur Verfügung zu stellen.

Diese Aufgabe wird gelöst durch Verfahren zur Bestimmung der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich an der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit den Schritten:

1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
2. spektral aufgelöste oder winkelaufgelöste Messung bzw. Messung bei bestimmten Kombinationen aus Wellenlänge und Winkeleinstellung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms;
3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche.

Diese Aufgabe wird auch gelöst durch Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem aus der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich an der freien Grenzfläche eines ein Deckschichtsystem aufweisenden Viellagensystems mit den Schritten:

1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
2. spektral aufgelöste oder winkelaufgelöste Messung bzw. Messung bei bestimmten Kombinationen aus Wellenlänge und Winkeleinstellung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms;
3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der Intensität der sich im Resonanzfall ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche;
4. Vergleich mit einem bereits bekannten Photoelektronenstromverlauf bezüglich der Phasenlage der entsprechenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche und Bestimmung des Dickenunterschieds durch Ermittlung des Abstandes zwischen den beiden Phasenlagen.

Ferner wird die Aufgabe gelöst durch Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem aus der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich an der freien Grenzfläche eines ein Deckschichtsystem aufweisenden Viellagensystems mit den Schritten:

1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;

2. spektral aufgelöste oder winkelaufgelöste Messung bzw. Messung bei bestimmten Kombinationen aus Wellenlänge und Winkeleinstellung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms;
3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche;
4. Vergleich des experimentell ermittelten Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität mit für unterschiedliche Dicken des Deckschichtsystems ausgeführten Modellrechnungen.

Die Aufgabe wird außerdem gelöst durch Vorrichtungen zur Durchführung von Verfahren gemäß den Ansprüchen 1 bis 12 aufweisend Mittel zum räumlichen und spektralen Einstellen von eingehender Strahlung und eine Vakuumkammer, in der ein Photonendetektor, ein Photoelektronendetektor und ein Probenhalter angeordnet sind, wobei als Photoelektronendetektor ein elektrisch leitendes Weitwinklelement benutzt wird und wobei die Mittel zum räumlichen und spektralen Einstellen von eingehender Strahlung auf das Bereitstellen eines schmalbandigen Strahls mit geringem Strahldurchmesser optimiert sind oder auf das Bereitstellen eines schmalbandigen Strahls mit geringer Divergenz optimiert sind.

Vorteilhafterweise werden Verfahrensschritte ortsaufgelöst durchgeführt.

Vorteilhafterweise werden die experimentell gewonnenen Daten zusätzlich mit Referenzdaten verglichen, die an spezifizierten Viellagensystemen gewonnen werden und/oder die außerhalb der Resonanz an dem Viellagensystem gemessen werden.

Vorteilhafterweise weisen die Vorrichtungen eine Strahlungsquelle für extrem ultraviolette und/oder weiche Röntgenstrahlung auf.

Vorteilhafterweise weist der Probenhalter drei Translationsfreiheitsgrade und drei Rotationsfreiheitsgrade auf.

Vorteilhafterweise ist eine Einrichtung vorgesehen, um ein definiertes elektrisches Feld in der Probenumgebung zu erzeugen.

Vorteilhafterweise werden zwei oder mehr Proben in die Vorrichtung zur Vermessung eingebracht, wobei sie in Serie miteinander elektrisch verbunden sind.

Kurze Beschreibung der Figuren

Fig. 1a, b das Grundprinzip des Verfahrens zur Bestimmung der Phasenlage;

Fig. 2a, b ein erstes Verfahren der Bestimmung der Schichtdicke;

Fig. 3a, b, c ein zweites Verfahren der Bestimmung der Schichtdicke;

Fig. 4a-n Berechnete spektral aufgelöste Verläufe der Reflektivität und des Photoelektronenstroms sowie der Intensitätsverlauf einer entsprechenden sich im Resonanzfall ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle;

Fig. 5 die Messanordnung zur Messung des Photostroms und der Reflektivität.

Ausführliche Beschreibung der Erfindung

Mit Hilfe der erfindungsgemäßen Verfahren und Vorrichtungen ist es möglich, durch die Messung des Photostroms über die aus der Reflektometrie bekannten Parameter hinausgehende Parameter zu bestimmen. So kann nun die Phasenlage einer sich im Resonanzfall an der freien Grenzfläche eines Viellagensystems ausbildenden stehenden Welle bestimmt werden. Dies ist insbesondere von Bedeutung, wenn sich auf dem Viellagensystem ein Deckschichtsystem zum Schutz gegen äußere Einflüsse, wie Energieeintrag und Kontamination befindet. Die üblichen messtechnischen Verfahren lieferten bislang keine hinreichenden Informationen über die Phasenanpassung des Deckschichtsystems im Verhältnis zum periodischen Anteil in Form des Viellagensystems. Die Kenntnis dieser Phasenanpassung ist aber zwingend notwendig, da sowohl die erreichbare Reflektivität und deren Änderung im Verlauf der Lebensdauer, die Photoemission und damit die Degradation der Oberflächen im Verlauf der Lebensdauer als auch die Wellenfront und damit die Abbildungseigenschaften im Verlauf der Lebensdauer wesentlich durch diese Phasenanpassung beeinflusst werden.

Die Erfindung dient dazu, im Spektralbereich der extremen Ultraviolettsstrahlung oder der weichen Röntgenstrahlung optische Elemente bzw. Komponenten optischer Systeme zu vermessen. Bevorzugtes Anwendungsgebiet ist die Vermessung von Optiken für EUV-Strahlung, die aufgrund einer Beschichtung mit bis zu 100 oder mehr Lagen von wenigen Nanometer Dicke aus abwechselnd verschiedenen Materialien (beispielsweise Molybdän und Silizium oder

Molybdän und Beryllium) in einem schmalen Spektralbereich hohe Reflektivitäten erreichen. Derartige Systeme finden im Bereich der EUV-Lithographie ihre Anwendung. Zur Überwachung des Herstellprozesses und zur Qualitätssicherung der Komponenten im EUV-Lithographiesystem kann die hier vorgeschlagene spektral- und/oder winkelaufgelöste photoelektrische Charakterisierung verwendet werden. Im einzelnen werden mittels spektral- und/oder winkelaufgelöster photoelektrischer Detektion preiswert und mit möglichst geringem apparativem Aufwand in möglichst kurzer Messdauer die Dicke der Deckschicht eines reflektiven optischen Elementes und dessen räumliche Homogenität bestimmt.

Die spektral aufgelöste photoelektrische Charakterisierung wird mit Hilfe einer Anordnung durchgeführt, bei der eine Strahlungsquelle polychromatische EUV-Strahlung divergent emittiert und Mittel zur Kollimation des Strahls sowie Mittel zur spektralen Zerlegung vorgesehen sind. Ferner benötigt man eine Elektronenauffangvorrichtung mit einem Strommessgerät zur Erfassung der emittierten photoinduzierten Elektronen sowie einen Photonendetektor zur Messung der Reflektivität. Während der Messung wird das zu charakterisierende Objekt unter einem festen Winkel zu dessen Oberfläche bestrahlt.

Bei der winkelaufgelösten photoelektrischen Charakterisierung hingegen wird das zu charakterisierende Objekt mit einer festen Wellenlänge, aber bei unterschiedlichen Winkeln bestrahlt. In einer weiteren Variante kann die Messung auch bei bestimmten Kombinationen von Wellenlänge und Winkel durchgeführt werden.

Die Phasenlage der stehenden elektromagnetischen Welle wird dadurch bestimmt, dass der Verlauf des Photoelektronenstromsignals im Bereich der maximalen Reflektivität bestimmt wird. Im Bereich der

maximalen Reflektivität heißt dabei bevorzugt in einem Bereich von -3 % bis + 1% der Wellenlänge bzw. in einem entsprechenden Bereich des Winkels der maximalen Reflektivität. Dabei wird von der Prämisse ausgegangen, dass der Photoelektronenstrom in erster Näherung proportional zur Intensität der stehenden elektromagnetischen Welle am Ort der freien Grenzfläche zum Vakuum ist. Befinden sich auf den Viellagensystemen noch weitere Deckschichten bzw. Kontaminationsschichten, so bildet deren äußerste Fläche die freie Grenzfläche zum Vakuum. Im allgemeinen Fall ist die Phasenlage der elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche beliebig. Über die gleichzeitige Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms kann die Phasenlage aber präzise bestimmt werden.

Auf dem gleichen Prinzip basiert auch das Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem. In einer einfachen Variante wird die gemessene Photoelektronenstromkurve mit einer bereits bekannten Photoelektronenstromkurve verglichen. Diese kann zuvor an der gleichen oder einer vergleichbaren Probe (z. B. gleiches Viellagensystem, aber unterschiedliches Deckschichtsystem oder unterschiedliche Kontaminationsgrade) gemessen worden sein oder auch durch Modellrechnungen ermittelt worden sein. Aus dem Photoelektronenstromverlauf im Bereich der maximalen Reflektivität kann die jeweilige Phasenlage bezüglich der freien Grenzfläche bestimmt werden, die den jeweiligen räumlichen Positionen der freien Grenzfläche zum Viellagensystem entspricht. Durch Differenzbildung der jeweiligen Positionen kann der Dickenunterschied der beiden Proben bestimmt werden bzw. bei bekannter Deckschichtdicke der Vergleichsprobe die Deckschichtdicke der vermessenen Probe und zwar mit einer Auflösung von ca. 3 Å. Um die Genauigkeit der Dickenmessung auf eine Auflösung unter 1 Å zu erhöhen, wird der gemessene Photoelektronenstromverlauf im Bereich der maximalen

Reflektivität an für verschiedene Schichtdicken modellierte Daten gefüllt.

Zur Erhöhung der Informationsdichte, insbesondere beim Herstellprozess oder bei der Wartung von auf ein Viellagensystem mit Deckschichtsystem basierenden reflektiven optischen Elementen hat es sich als vorteilhaft erwiesen, alle Schritte ortsaufgelöst durchzuführen. Bei der Herstellung lassen sich mittels dieser Informationen die Beschichtungsparameter optimieren, während bei der Wartung die reflektiven optischen Elemente lokal gereinigt werden können bzw. deren Zustand überwacht werden kann. Um die Genauigkeit zu erhöhen, kann man außer die Messdaten mit Modellrechnungen zu vergleichen, diese auch mit Referenzdaten vergleichen, die z. B. außerhalb der Resonanz an dem speziellen Viellagensystem gemessen wurden oder auch mit Referenzdaten, die an genau spezifizierten Viellagensystemen gewonnen wurden.

Die Vorrichtung zur Durchführung der Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass als Photoelektronendetektor ein Weitwinkelement wie z. B. ein Drahtnetz oder ein Weitwinkelblech oder gar die Wandung der Vakuumkammer benutzt werden. Dadurch wird ein maximaler Emissionswinkel der Photoelektronen überdeckt, so dass auch bei geringen Photoelektronenströmen ein zuverlässiges Signal erhalten wird.

Außerdem werden besondere Maßnahmen zur spektralen oder räumlichen Strahlformung getroffen. Üblicherweise erfolgt die räumliche Strahlformung z. B. über Kollimatoren. Die Hauptanforderungen an den Strahl in räumlicher Hinsicht sind in der Regel geringe Divergenz für eine hohe Winkelauflösung oder ein möglichst kleiner Strahlfleck für eine hohe Ortsauflösung. Die spektrale Strahlformung erfolgt üblicherweise z. B. über Monochromatoren. Dazu kann man

insbesondere bei schmalbandigen Quellen z. B. Quellen mit Linienspektrum, beispielsweise Gitterstrukturen, Folienfilter, Spiegelreflektoren o. a. verwenden. Bei breitbandigen Quellen werden durchstimmbare Monochromatoren bevorzugt, so z. B. bewegliche Gitterstrukturen, ggf. in Kombination mit einem Spalt. Mithilfe von fokussierenden Monochromatoren können sowohl die räumlichen als auch die spektralen Eigenschaften des Strahls beeinflusst werden. Für Messungen mit hoher Energieauflösung sollte der Monochromator möglichst schmalbandig sein.

Indem der Probenhalter drei Translations- und drei Rotationsfreirgrade aufweist, lassen sich ortsaufgelöste Messungen bei fester Wellenlänge und/oder festem Einfallswinkel bzw. Kombination von bestimmten Wellenlängen und Winkeln einfacher durchführen. Insbesondere kann dadurch einfacher gewährleistet werden, dass die gesamte zu prüfende Oberfläche gleichmäßig abgerastert wird.

In einer besonders bevorzugten Ausführung weist die Vorrichtung eine Einrichtung auf, um ein elektrisches Feld in der Probenumgebung anzulegen. Mit Hilfe dieses elektrischen Feldes lassen sich die Photoelektronen auf das Weitwinkelelement beschleunigen, so dass auch niederenergetische Photoelektronen erfasst werden. Dadurch wird die Messgenauigkeit erhöht. Außerdem können ggf. vorhandene Ionen abgeschirmt werden, damit sie das Messergebnis nicht verfälschen.

Als Strahlungsquelle insbesondere für Wellenlängen zwischen 1 – 20 nm kommen vor allem laserinduzierte Plasmen, entladungsinduzierte Plasmen und relativistische Elektronen in Frage. Die aus relativistischen Elektronen resultierende Synchrotronstrahlung zeichnet sich durch ein breites Energiespektrum bei niedriger Divergenz aus. Die beiden anderen Strahlungsquellen sind aufgrund deren potentiellen Einsatzes im Labormaßstab besonders bevorzugt.

In Fig. 1a ist das Prinzip des Verfahrens zur Bestimmung der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich an der freien Grenzfläche eines Viellagensystems dargestellt. Zunächst wird die Lage der maximalen Reflektivität festgestellt (in Fig. 1a, b durch senkrechten Strich-Punkt-Strich gekennzeichnet), die die Lage der freien Grenzfläche visualisiert. Links davon liegt bei Auftragung gegen die Wellenlänge das Vakuum, rechts davon das Deckschichtsystem und der periodische Anteil des Viellagensystems. In einem Abstand von -3 % bis +1 % um die Wellenlänge der maximalen Reflektivität herum wird der Verlauf der Photoelektronenstromkurve betrachtet. Befindet sich in diesem Bereich ein Maximum (wie in Fig. 1a), so befindet sich auch ein Maximum der Intensität der stehenden Welle im Bereich der freien Grenzfläche – entsprechend mit einem Minimum (wie in Fig. 1b) oder einer Flanke (nicht dargestellt). Bei Auftragung der Messkurven gegen die Wellenlänge in der in Fign. 1a,b dargestellten Weise entspricht der Verlauf der Photoelektronenstromkurve dem Verlauf der Intensität der stehenden Welle im Bereich der freien Grenzfläche. Bei Auftragung gegen die Energie ist dies Seitenverkehrt. Führt man winkelaufgelöste Messungen durch, ist der Kurvenverlauf analog dem bei wellenlängenaufgelösten Messungen.

Eine einfache Möglichkeit der Dickenbestimmung ist in den Figuren 2a, b dargestellt: Ein unbeschichtetes oder unkontaminiertes Viellagensystem wird wie beschrieben vermessen und die Phasenlage der Intensität der stehenden Welle bezüglich der freien Grenzfläche als Referenzlage mit Dicke $d = 0 \text{ \AA}$ bestimmt. Das beschichtete bzw. kontaminierte Viellagensystem wird ebenfalls vermessen. Aus dem Abstand zwischen der ersten Phasenlage und der zweiten Phasenlage ergibt sich im vorliegenden Beispiel der Dickenunterschied von 35 \AA . Hierbei erreicht man Genauigkeit im Angström-Bereich.

Möchte man die Dicken bis in den Subangströmbereich genau bestimmen, greift man auf für unterschiedliche Dicken modellierte Photoelektronenstromkurven zurück, an die die Messkurve gefittet wird. Die Genauigkeit kann dadurch erhöht werden, dass in die Modellkurvenberechnung Werte aus Messungen außerhalb der Resonanz oder auch von Messungen an genau spezifizierten Viellagensystemen einfließen. Bei dieser Art der Dickenbestimmung wird ausgenutzt, dass Dickenunterschiede sich nur marginal in einer Änderung der Reflektivitätskurve (siehe z. B. Fig. 3a für geringe Kohlenstoffdicken und Fig. 3b für dickere Kohlenstoffdicken), aber in einer signifikanten Änderungen Photoelektronenstromkurve äußern.

Die freie Grenzfläche, d.h. die oberste Fläche zum Vakuum eines Viellagensystems wird mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich vermessen. Als Strahlungsquelle kann jede beliebige EUV-Quelle verwendet werden, wie z. B. laser-oder entladungserzeugte Plasmen. Besonders genaue Messungen lassen sich mit gut kollimierten Strahlen, die zu kleinen, intensiven Beleuchtungsflecken führen, erhalten, wie sie z. B. auch mit Synchrotronstrahlung erzeugt werden können. Mit Hilfe des Beleuchtungsflecks wird die gesamte beschichtete Fläche abgerastert, so dass zweidimensionale Phasenlage- bzw. Dickenverteilungen gemessen werden und auch geometrische Beschichtungsparameter dadurch präzise bestimmt und damit verändert werden können. Das gleichzeitige Vermessen der Reflektivität und des Photoelektronenstroms geschieht entweder winkel- oder energiedispersiv oder bei bestimmten Kombinationen von Winkeln und Energien.

In Fign. 3a, b, c sind beispielhaft die energiedispersiv gemessenen Photostromkurven und die teilweise entsprechend modellierten Kurven

für geringe Kohlenstoffdicken von 2 Å, 2,5 Å, 3 Å, 3,5 Å (Fig. 3a), 3 Å, 6 Å, 12 Å (Fig. 3b), 10 Å, 20 Å, 30 Å (Fig. 3c) bzw. ganz ohne Kohlenstoffsicht in beliebigen Einheiten dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Reflektivitätskurven für die Proben mit der jeweils dicksten Kohlenstoffsicht und für die Probe ohne Kohlenstoffsicht dargestellt. In Fig. 3a, c sind die reinen Messkurven dargestellt. In Fig. 3b sind die entsprechenden simulierten Kurven durch die gemessene Photoelektronenstromkurve gelegt. Alle Photoelektronenstromkurven werden gleich normiert, so dass die maßstabsgerecht sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die berechneten und gemessenen Photoelektronenstromkurven sich systematisch durch einen konstanten Untergrund in Form einer konstanten Verschiebung nach oben der experimentellen Kurven unterscheiden. Das liegt darin begründet, dass bei einer Austrittstiefe größer Null selbst bei Feldstärke Null in der Nähe der freien Grenzfläche ein Photostrom größer Null auftritt. Die material- und schichtdickenabhängige Austrittstiefe und ähnliche Effekte können auch zur Beeinflussung der Form der Photoelektronenstromkurve führen, was in Modellrechnungen entsprechend zu berücksichtigen ist.

Gut erkennbar ist zum einen, dass die unterschiedlichen Kohlenstoffsichten sich nur gering auf die Reflektivität auswirken, die Änderungen in der Photoelektronenkurve aber sehr deutlich sind. Zum anderen lässt sich gut erkennen, dass wegen dieser starken Veränderung in der Photoelektronenstromkurve die Dicke durch Fitten an modellierte Daten sich tatsächlich bis in den Subangströmbereich genau bestimmen lässt.

Der berechnete Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Photoelektronenstromkurve im Bereich maximaler Reflektivität und der Phasenlage der sich im Resonanzfall an dem reflektiven optischen Element ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle wird anhand der Fig. 4a-n illustriert. Es sind zum einen in der oberen Hälfte

die gleichzeitig gemessenen Reflektivitäts- und Photoelektronenstromkurven und zum anderen in der unteren Bildhälfte die Ortsverteilung der Intensität der stehenden Welle wieder exemplarisch für Kohlenstoffschichten der Dicken von 0 Å bis 65 Å und in beliebigen Einheiten dargestellt.

Die Lage der maximalen Reflektivität wird ganz überwiegend von dem exemplarisch gewählten Molybdän-Silizium-Viellagensystem bestimmt. Zu einem geringen Teil wird die Lage der maximalen Reflektivität auch von darüberliegenden Schichten, hier beispielsweise Kohlenstoff bestimmt. Das Vorhandensein eines Deckschichtsystems aus z. B. Kohlenstoff und Silizium oder auch Ruthenium wirkt sich vor allem auf den absoluten Wert der maximalen Reflektivität aus. Als freie Grenzfläche wird die Grenzfläche zum Vakuum, hier speziell die Grenzfläche der Kohlenstoffschicht zum Vakuum bezeichnet.

Vergleicht man nun jeweils die oberen und unteren Bildhälften, stellt man fest, dass sich bei konstanter Lage der Intensität der stehenden Welle relativ zum Viellagensystem die Lage der freien Grenzfläche mit unterschiedlicher Kohlenstoffdicke ändert, so dass die Intensität der stehenden Welle an der freien Grenzfläche für unterschiedliche Kohlenstoffdicken unterschiedliche Werte annimmt. Niedrige Intensitätswerte bei hohen Kohlenstoffdicken äußern sich in minimalem Photoelektronenstrom im Resonanzfall und hohe Intensitäten bei geringen Kohlenstoffdicken äußern sich in maximalem Photoelektronenstrom im Resonanzfall. Deutlich erkennbar ist, dass der Verlauf der Photoelektronenstromkurve im Bereich der maximalen Reflektivität dem Verlauf der Intensität der stehenden Welle im Bereich der freien Grenzfläche entspricht.

In Figur 5 ist der prinzipielle Messaufbau zur Durchführung der Verfahren zur Bestimmung der Phasenlage bzw. der Schichtdicken

dargestellt. Die von einer Strahlungsquelle 1 ausgehende, durch einen Pfeil dargestellte Strahlung trifft auf Mittel zur räumlichen und spektralen Formung der Strahlcharakteristik, hier beispielhaft ein Kollimator 2 und ein Monochromator 3. Bei der Strahlungsquelle handelt es sich um eine Strahlungsquelle für Wellenlängen im Bereich von 1 bis 20 nm. Dazu eignen sich z. B. laserinduzierte Plasmen oder entladungsinduzierte Plasmen oder auch relativistische Elektronen.

Der Kollimator 2 kann dazu dienen, einen Messstrahl mit geringer Divergenz am Probenort bereitzustellen, um eine hohe Winkelauflösung zu gewährleisten, oder auch einen kleinen Strahldurchmesser am Probenort bereitzustellen, um eine hohe Ortsauflösung zu erreichen.

Der Monochromator 3 dient primär der Auswahl der Messwellenlänge. Um eine hohe Energieauflösung zu gewährleisten, sollte er möglichst schmalbandig sein. Insbesondere in Verbindung mit breitbandiger Strahlung, wie z. B. Synchrotronstrahlung, wählt man einen durchstimmmbaren Monochromator, um energiedispersive Messungen durchzuführen. Dabei kann der Monochromator z. B. als bewegliches Gitter in Kombination mit ggf. einem Spalt ausgebildet sein. Insbesondere bei Strahlungsquellen mit Linienstruktur werden daran angepasste Monochromatoren verwendet wie z. B. feststehende Gitter, Folienfilter oder Spiegelreflektoren.

Die Komponenten 2 und 3 können auch in Form von fokussierenden Monochromatoren einteilig ausgebildet sein.

Die weiteren Komponenten der Messvorrichtung sind in einer Vakuumkammer angeordnet, die durch die gestrichelte Linie 10 angedeutet ist. Über ein load-lock 14 kann die Probe 6 eingebracht werden. Die Probe 6 besteht aus einem Viellagensystem 8 auf einem Substrat 9 und ist auf einer elektrisch isolierten Probenaufnahme 7

befestigt. Diese Probenaufnahme weist drei Translations- und drei Rotationsfreigrade auf, so dass mit dem Messstrahl die gesamte Oberfläche der Probe 6 abgerastert werden kann.

Der auf das Viellagensystem 8 treffende Strahl wird reflektiert. Der reflektierte Strahl wird von einem Photonendetektor 15 zur Messung der Reflektivität vermessen. Außerdem treten aus dem Viellagensystem 8 durch die eintreffende Strahlung induzierte Photoelektronen aus. Diese sind durch gestrichelte Pfeile angedeutet. Sie werden von einer Elektronenauffangvorrichtung 4 gesammelt. Der durch die auftreffenden Photoelektronen induzierte Strom wird über ein Amperemeter 13 gemessen. Als Elektronenauffangvorrichtung kann z. B. die Vakuumwand 10 oder auch ein Weitwinkelblech oder ein Drahtgitter dienen.

Um zwischen der Probe 6 und der Elektronenauffangvorrichtung 4 definierte elektromagnetische Verhältnisse zu schaffen, wird mithilfe der Komponente 5 ein definiertes elektrisches Feld angelegt. Das definierte elektrische Potenzial kann durch einen Ring, einen Zylinder oder ein Gitter angelegt werden. Die Komponente 5 kann dabei beliebig komplex gestaltet sein und ist mit einer Spannungsquelle 12 verbunden. Zur Erzeugung eines definierten elektrischen Potenzials kann beispielsweise auch die Probe selbst auf eine bestimmte Spannung gesetzt werden.

Vorzugsweise werden Amperemeter verwendet, bei denen auch eine bestimmte Grundspannung einstellbar ist. Entsprechend kann man für die Komponente 5 ein Spannungsgerät verwenden, an dem auch an der Komponente 5 fließende Ströme auslesbar sind.

Das definierte elektrische Potenzial dient nicht nur dazu, die Elektronen auf die Elektronenauffangvorrichtung zu lenken, sondern insbesondere

auch dazu, die Elektronen bzw. die Elektronenauffangvorrichtung von ggf. vorliegenden Ionen, insbesondere positiv geladenen Ionen abzuschirmen. Dadurch wird die Messgenauigkeit der Photoelektronenstromkurve erhöht.

Um die Messgenauigkeit weiter zu erhöhen, kann auch der in Viellagensystem 8 bei Austreten der Photoelektronen fließende Strom über einen Amperemeter 11 gemessen werden. Auch hier kann ein Messgerät verwendet werden, bei dem auch die Spannung einstellbar ist.

In einer besonderen Variante sind zwei oder mehr Proben 6 in der Vakuumkammer 10 angeordnet, bei denen der an den Proben fließende Strom gemessen wird, indem die Proben untereinander parallel und/oder seriell mit dem Amperemeter 11 verschaltet sind. Der in der einen Probe während der Messung fließende Strom fließt dann ggf. über die andere Probe zum Amperemeter 11. Dies ist möglich, weil nicht Absolutströme gemessen werden, sondern nur der spektrale Verlauf der Photoemission, der nur von der einfallenden Strahlung beeinflusst wird.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich an der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit den Schritten:
 1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
 2. spektral aufgelöste Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms;
 3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche.
2. Verfahren zur Bestimmung der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich an der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit den Schritten:
 1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
 2. winkelaufgelöste Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms;

3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche.
3. Verfahren zur Bestimmung der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich an der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit den Schritten:
 1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
 2. Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms bei einer Kombination aus Wellenlänge und Winkeleinstellung;
 3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche.
4. Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem aus der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich an der freien Grenzfläche eines ein Deckschichtsystem aufweisenden Viellagensystems mit den Schritten:

1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
2. spektral aufgelöste Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms;
3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der Intensität der sich im Resonanzfall ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche;
4. Vergleich mit einem bereits bekannten Photoelektronenstromverlauf bezüglich der Phasenlage der entsprechenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche und Bestimmung des Dickenunterschieds durch Ermittlung des Abstandes zwischen den beiden Phasenlagen.
5. Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem aus der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich an der freien Grenzfläche eines ein Deckschichtsystem aufweisenden Viellagensystems mit den Schritten:
 1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;

2. winkelaufgelöste Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms;
3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der Intensität der sich im Resonanzfall ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche;
4. Vergleich mit einem bereits bekannten Photoelektronenstromverlauf bezüglich der Phasenlage der entsprechenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche und Bestimmung des Dickenunterschieds durch Ermittlung des Abstandes zwischen den beiden Phasenlagen.
6. Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem aus der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich an der freien Grenzfläche eines ein Deckschichtsystem aufweisenden Viellagensystems mit den Schritten:
 1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
 2. Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms bei bestimmten Kombinationen aus Wellenlänge und Winkeleinstellung;

3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der Intensität der sich im Resonanzfall ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche;
4. Vergleich mit einem bereits bekannten Photoelektronenstromverlauf bezüglich der Phasenlage der entsprechenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche und Bestimmung des Dickenunterschieds durch Ermittlung des Abstandes zwischen den beiden Phasenlagen.
7. Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem aus der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich an der freien Grenzfläche eines ein Deckschichtsystem aufweisenden Viellagensystems mit den Schritten:
 1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
 2. spektral aufgelöste Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms;
 3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche;

4. Vergleich des experimentell ermittelten Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität mit für unterschiedliche Dicken des Deckschichtsystems ausgeführten Modellrechnungen.
8. Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem aus der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich an der freien Grenzfläche eines ein Deckschichtsystem aufweisenden Viellagensystems mit den Schritten:
 1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
 2. winkelaufgelöste Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms;
 3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche;
 4. Vergleich des experimentell ermittelten Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität mit für unterschiedliche Dicken des Deckschichtsystems ausgeführten Modellrechnungen.
9. Verfahren zur Bestimmung der Dicke eines Deckschichtsystems auf einem Viellagensystem aus der Phasenlage einer stehenden elektromagnetischen Welle im extrem ultravioletten bis weichen

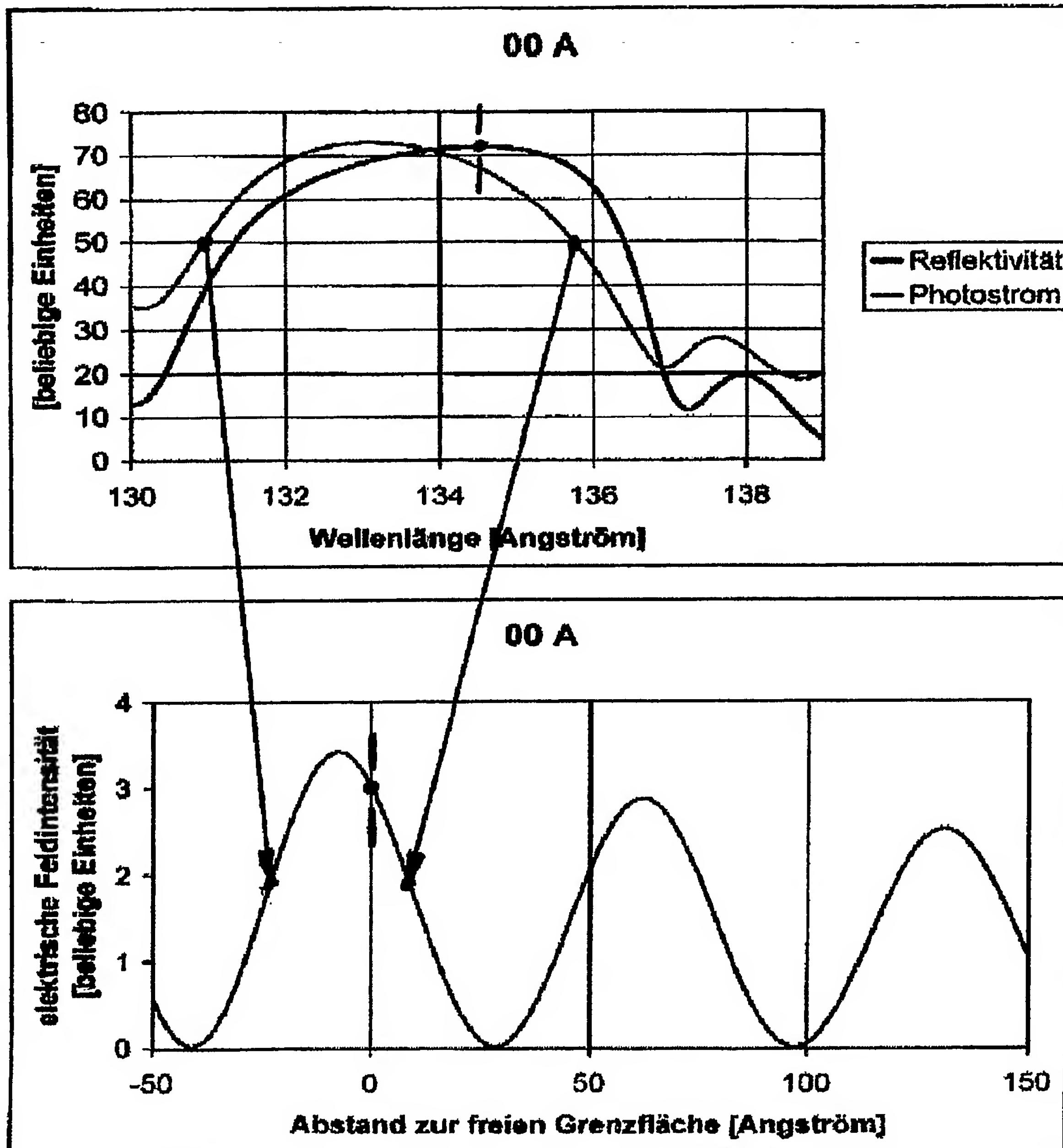
Röntgenwellenbereich an der freien Grenzfläche eines ein Deckschichtsystem aufweisenden Viellagensystems mit den Schritten:

1. Beleuchten der freien Grenzfläche eines Viellagensystems mit Strahlung im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich;
2. Messung der Reflektivität und des Photoelektronenstroms bei bestimmten Kombinationen aus Wellenlänge und Winkeleinstellung;
3. Bestimmung des Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität und daraus Ermittlung der Phasenlage der stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche;
4. Vergleich des experimentell ermittelten Verlaufs des Photoelektronenstroms im Bereich der maximalen Reflektivität mit für unterschiedliche Dicken des Deckschichtsystems ausgeführten Modellrechnungen.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle Schritte ortsaufgelöst durchgeführt werden.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die experimentell gewonnenen Daten außerdem mit Referenzdaten verglichen werden, die außerhalb der Resonanz an dem Viellagensystem gemessen wurden.

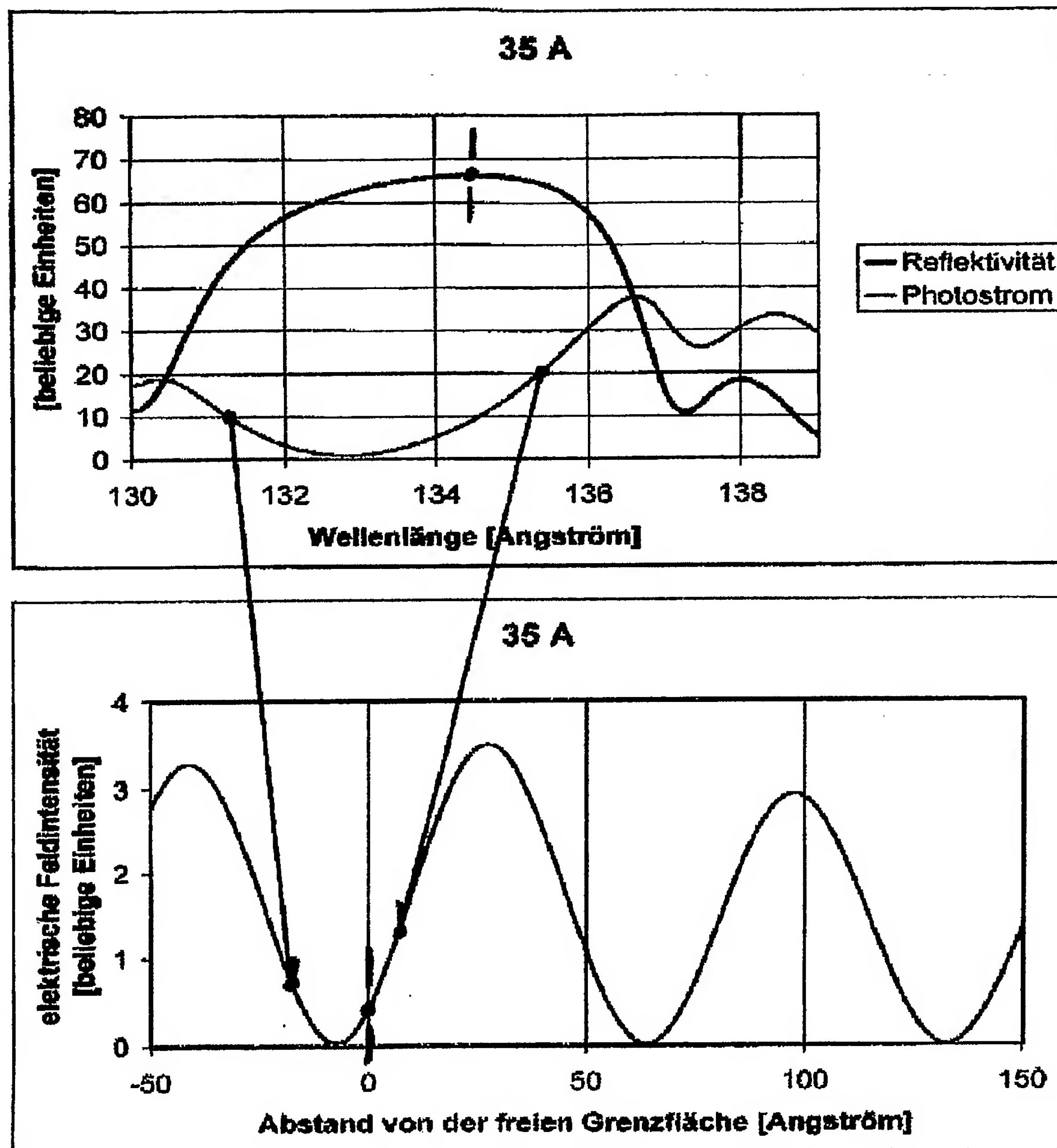
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11 **dadurch gekennzeichnet**, dass die experimentell ermittelten Daten außerdem mit Referenzdaten verglichen werden, die an spezifizierten Viellagensystemen gewonnen wurden.
13. Vorrichtung zur Durchführung von Verfahren gemäß den Ansprüchen 1 bis 12, aufweisend Mittel zum räumlichen und spektralen Einstellen von eingehender Strahlung sowie eine Vakuumkammer, in der ein Photonendetektor, ein Photoelektronendetektor und ein Probenhalter angeordnet sind, wobei als Photoelektronendetektor ein elektrisch leitendes Weitwinkelement benutzt wird und wobei die Mittel zum räumlichen und spektralen Einstellen von eingehender Strahlung auf das Bereitstellen eines schmalbandigen Strahls mit geringem Strahldurchmesser optimiert sind.
14. Vorrichtung zur Durchführung von Verfahren gemäß den Ansprüchen 1 bis 12, aufweisend Mittel zum räumlichen und spektralen Einstellen von eingehender Strahlung sowie eine Vakuumkammer, in der ein Photonendetektor, ein Photoelektronendetektor und ein Probenhalter angeordnet sind, wobei als Photoelektronendetektor ein elektrisch leitendes Weitwinkelement dient und wobei die Mittel zum räumlichen und spektralen Einstellen von eingehender Strahlung auf das Bereitstellen eines schmalbandigen Strahls mit geringer Divergenz optimiert sind.
15. Vorrichtung nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Probenhalter drei Translations- und drei Rotationsfreiheitsgrade aufweist.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Einrichtung, um ein elektrisches Feld in Probenumgebung anzulegen, vorgesehen ist.
17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Strahlungsquelle für extrem ultraviolette und/oder weiche Röntgenstrahlung vorhanden ist.
18. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens zwei Probenhalter sowie Mittel zur parallelen und/oder seriellen Verschaltung von 2 oder mehr Proben mit einem Ampermeter vorgesehen sind.

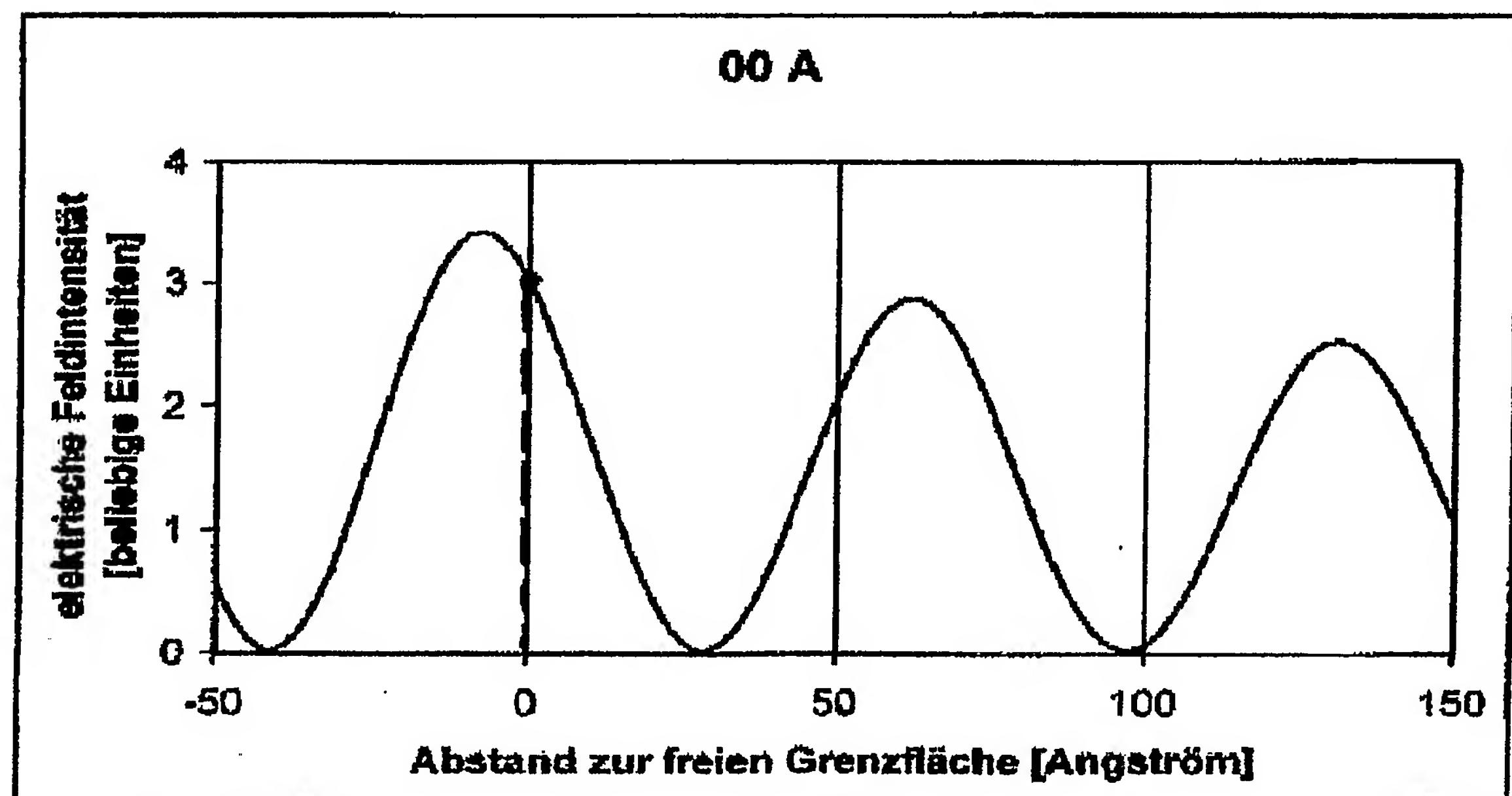
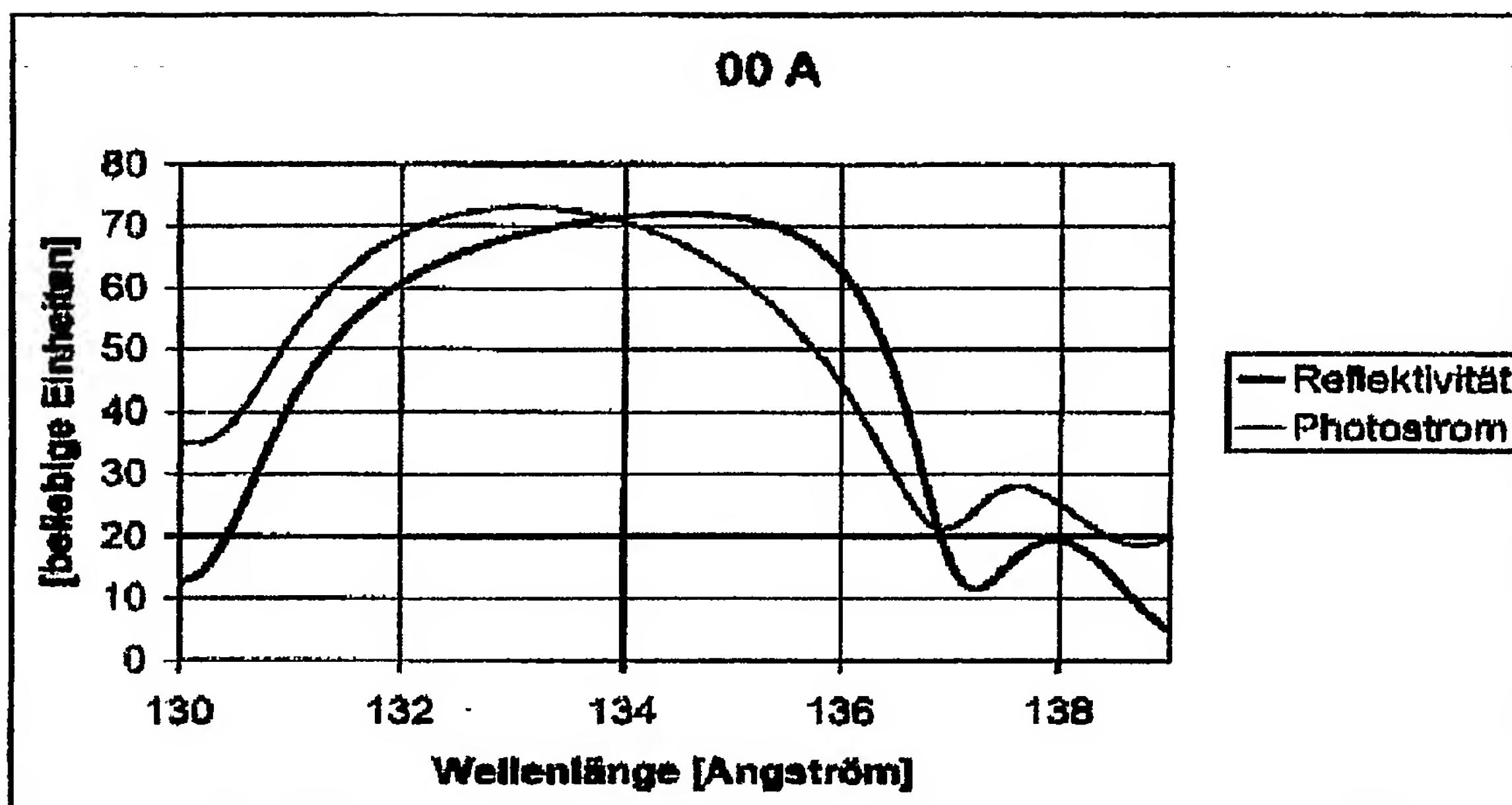
Figur 1a



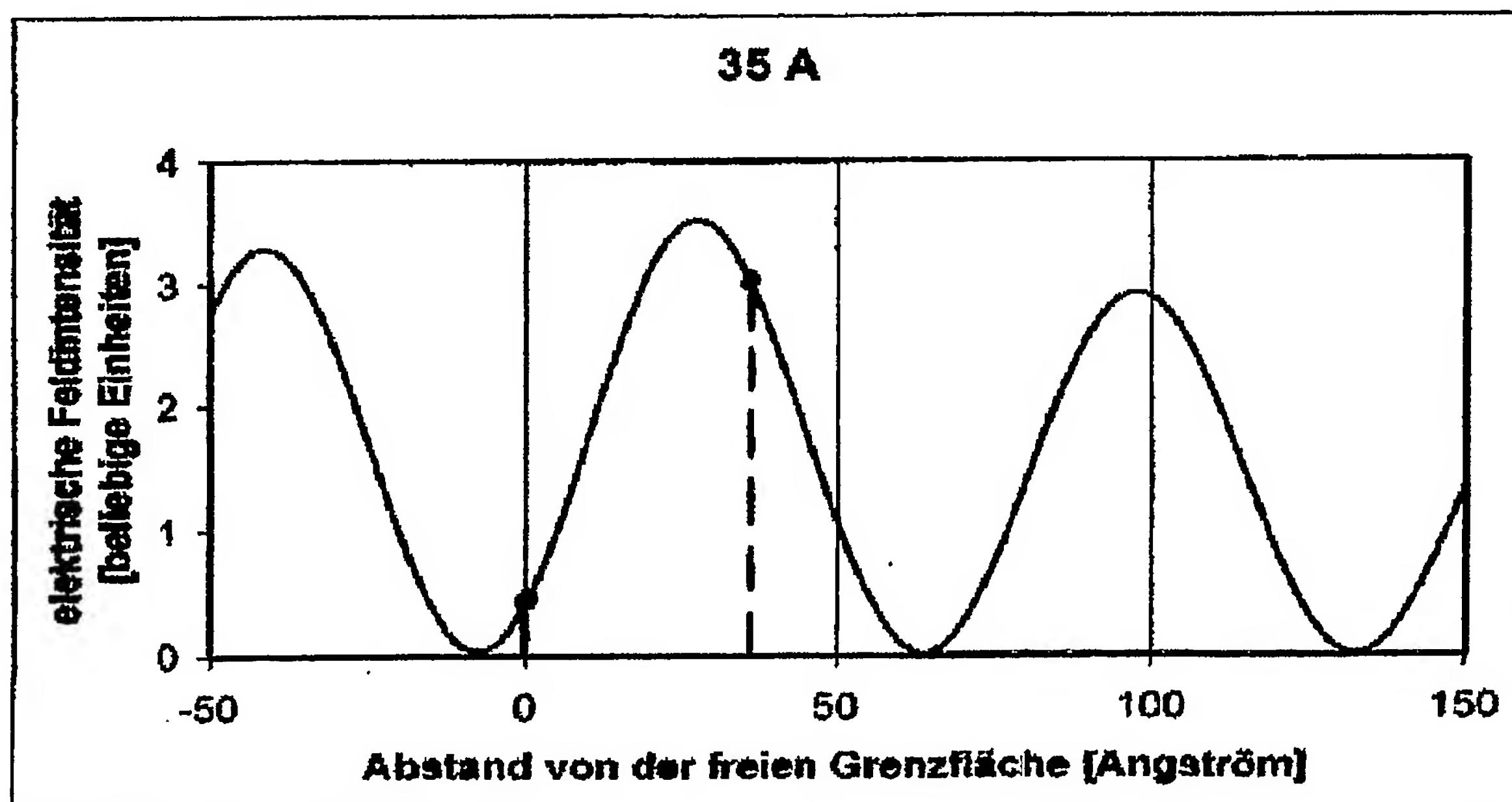
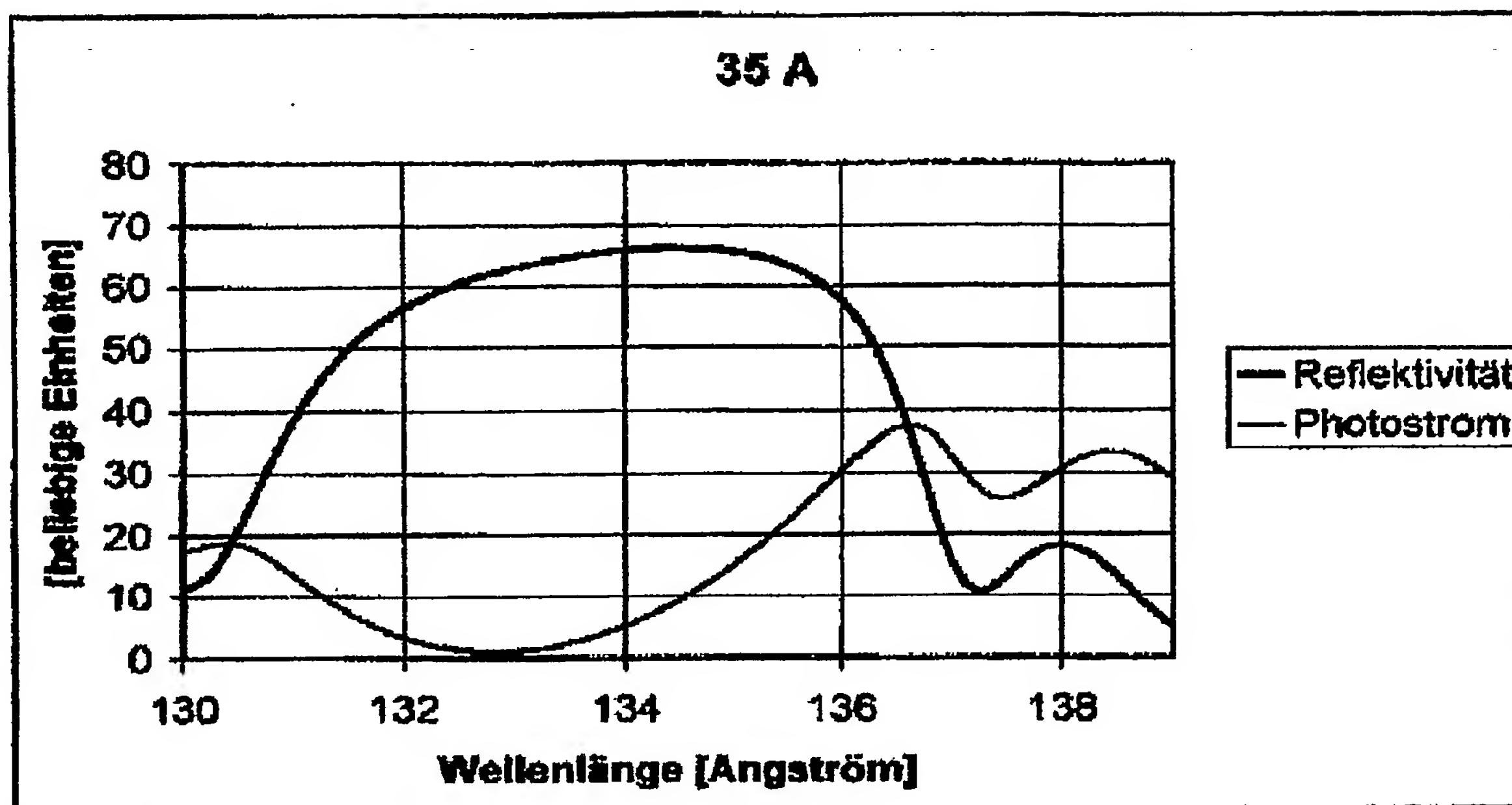
Figur 1b



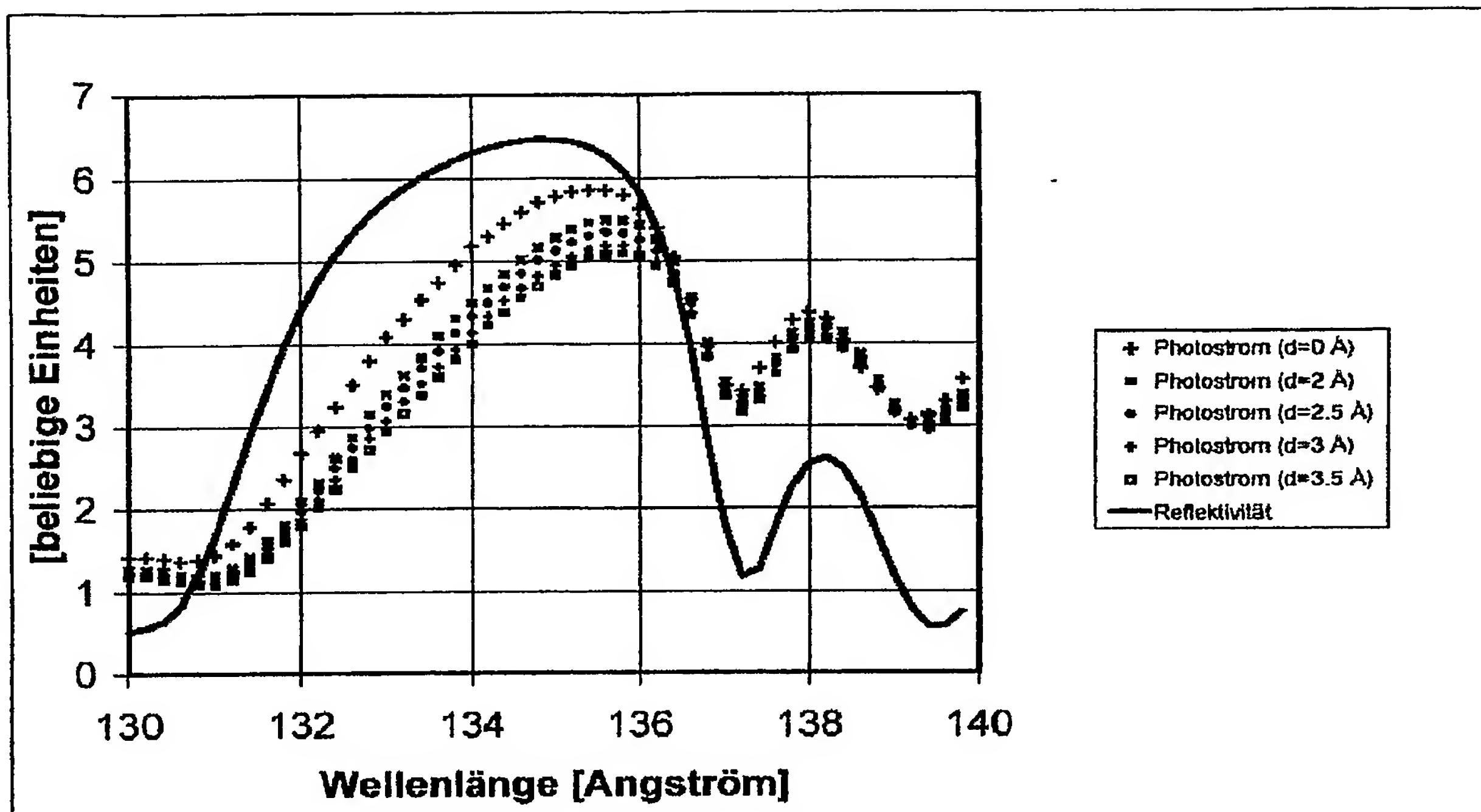
Figur 2a



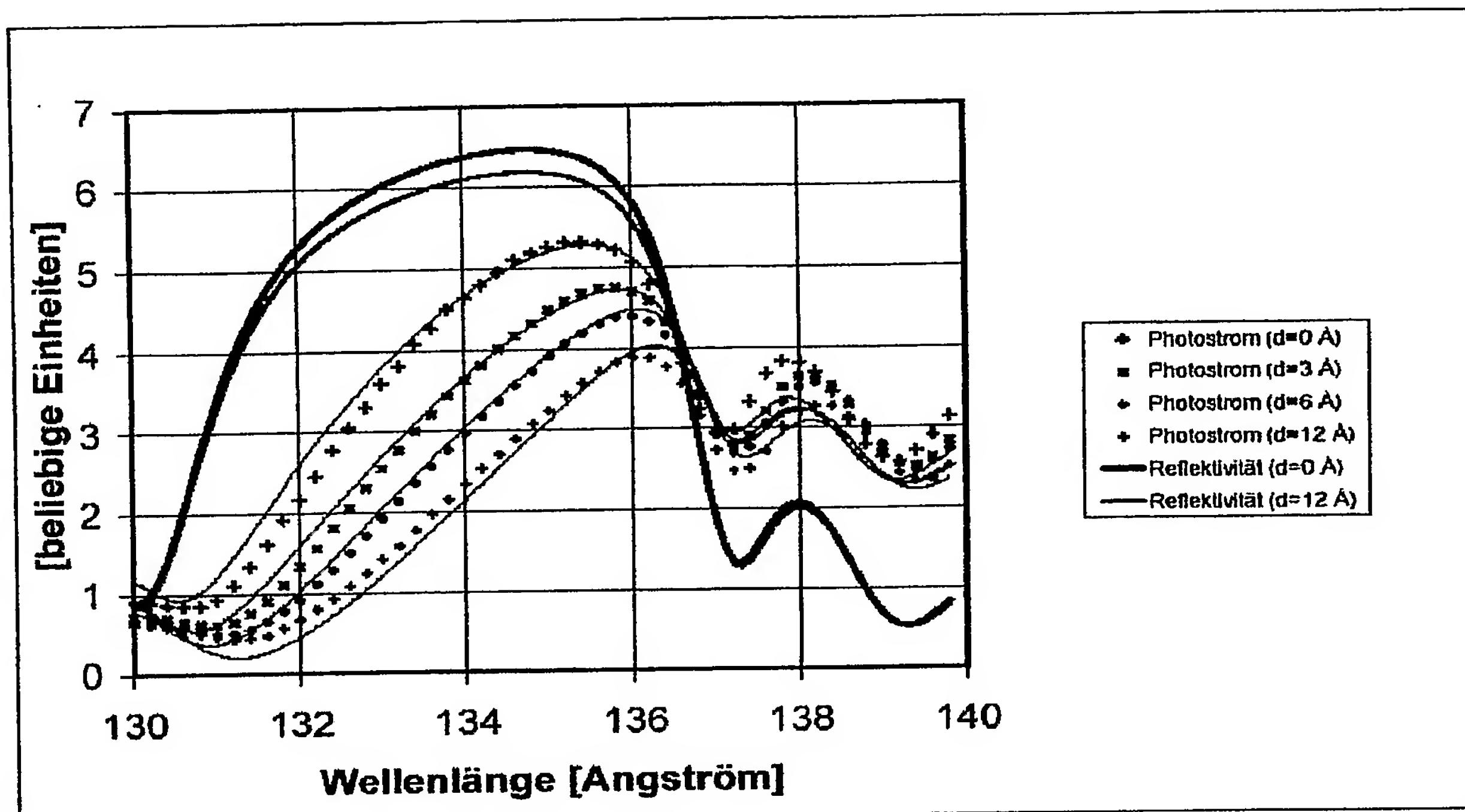
Figur 2b



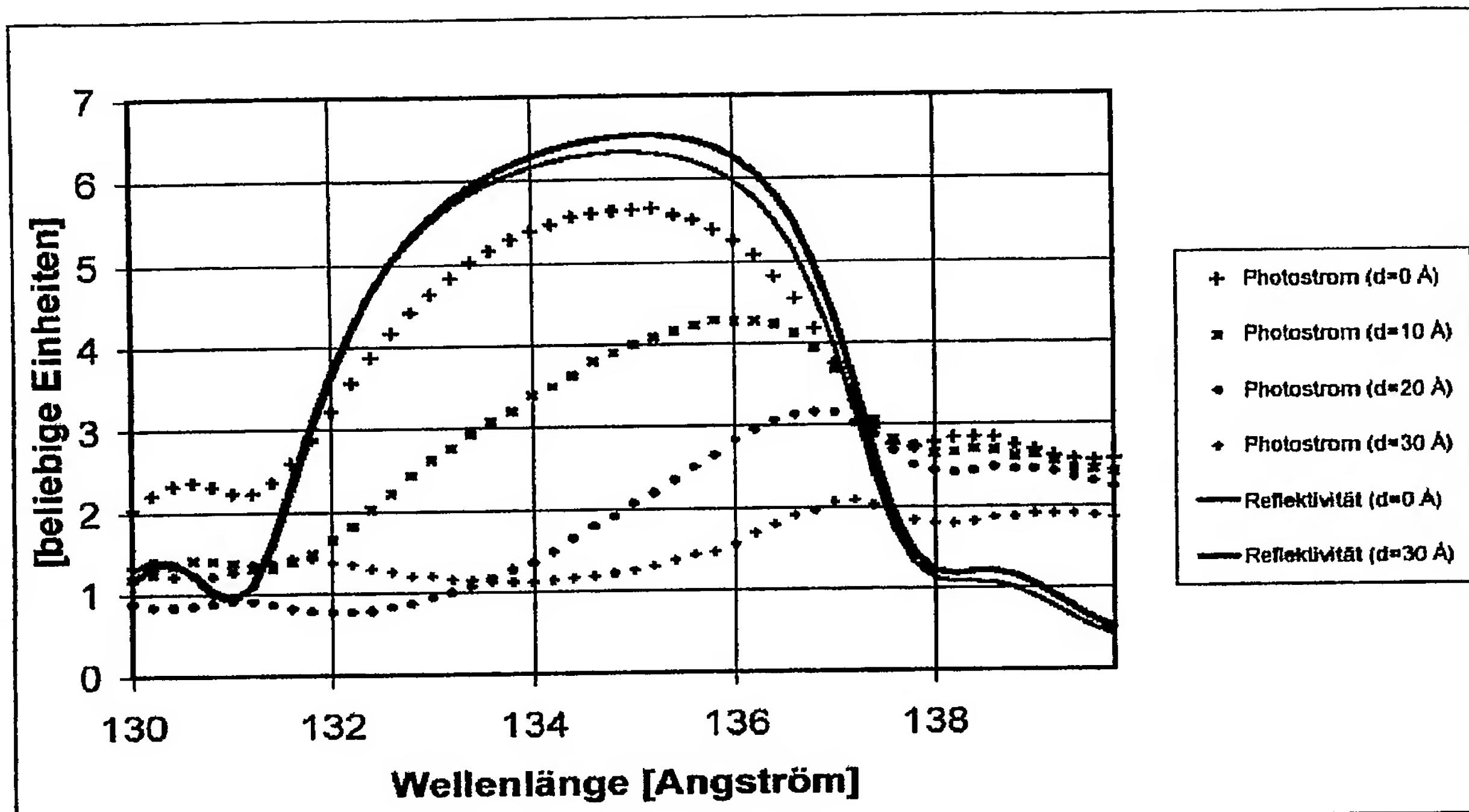
Figur 3a



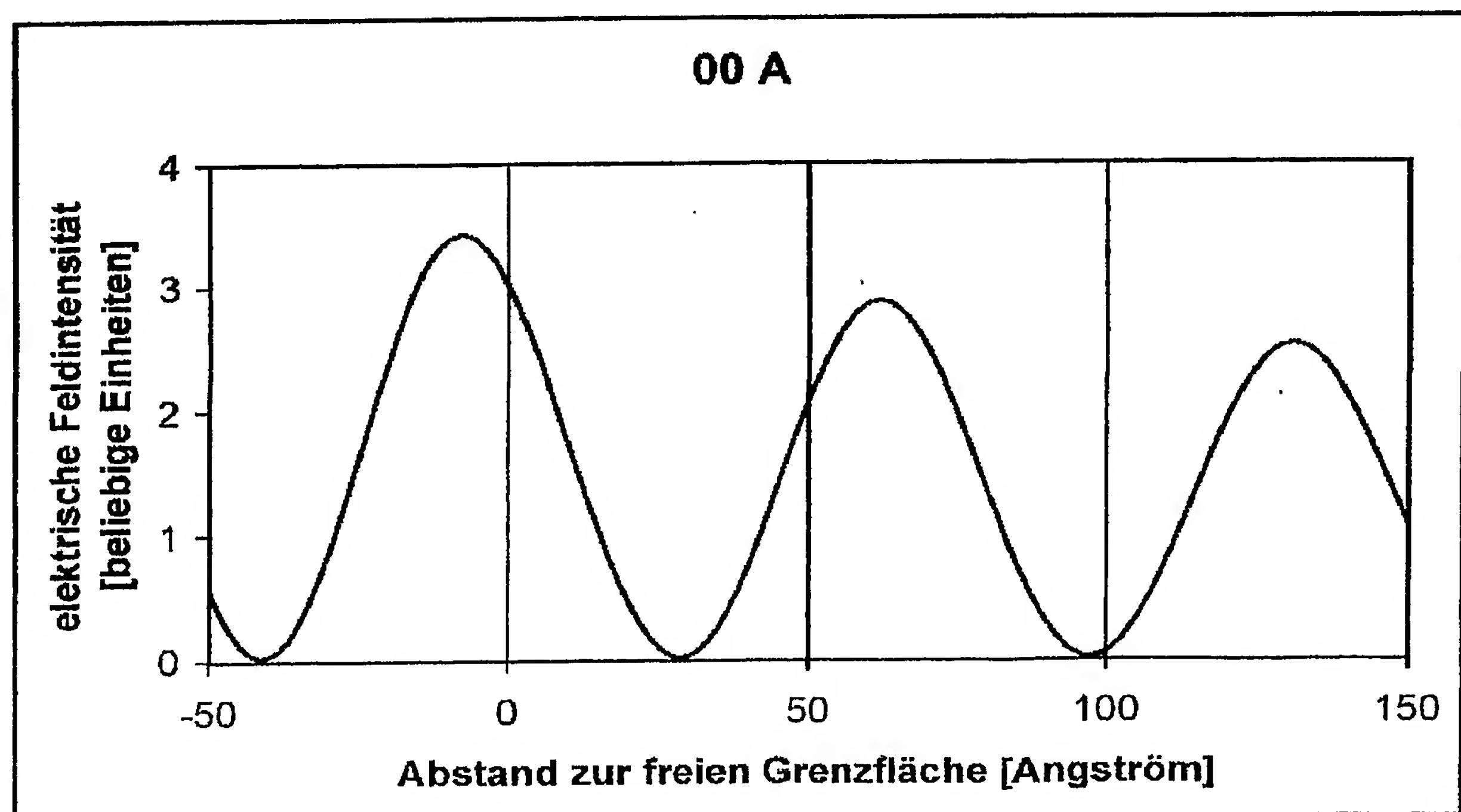
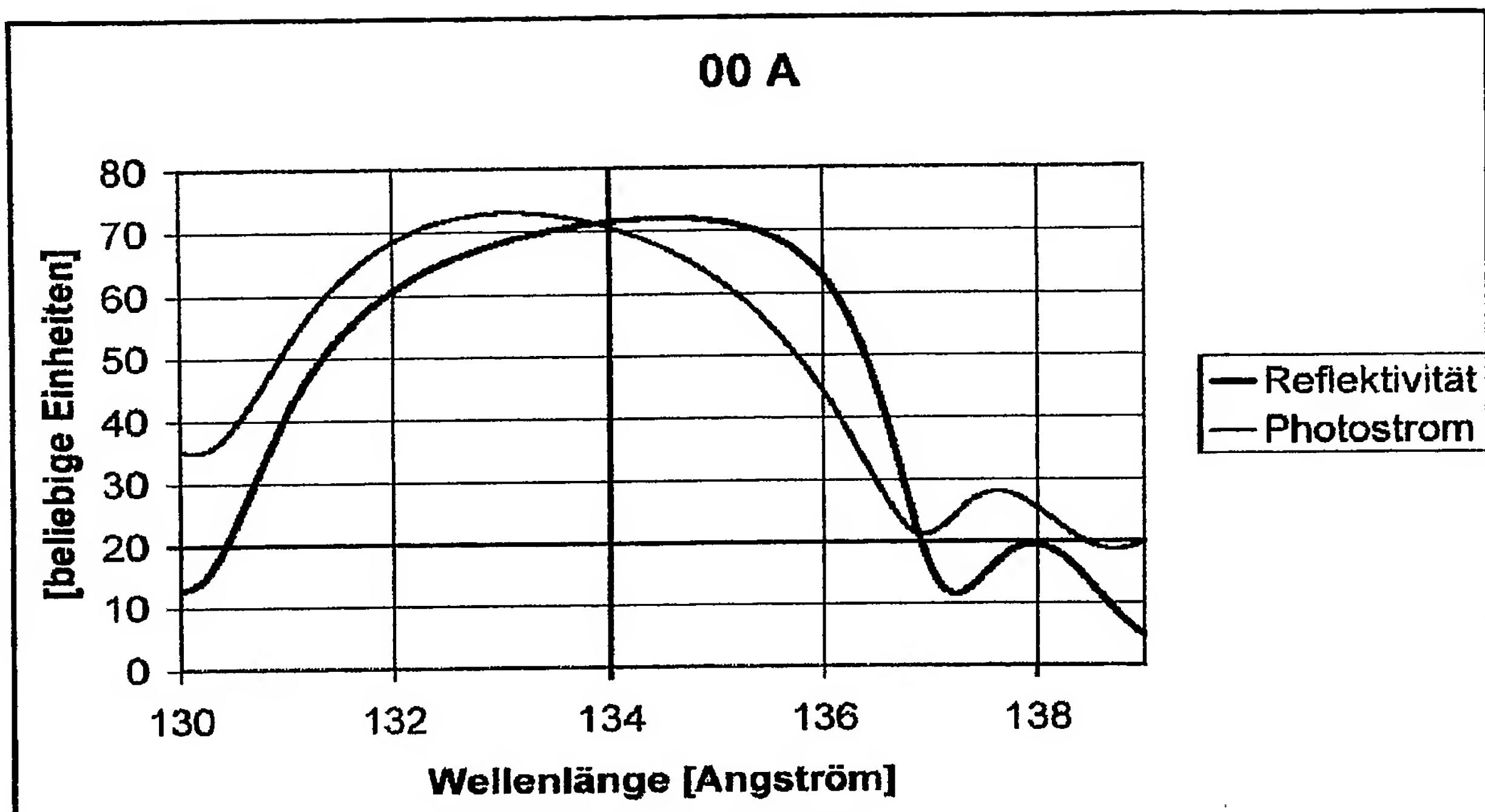
Figur 3b



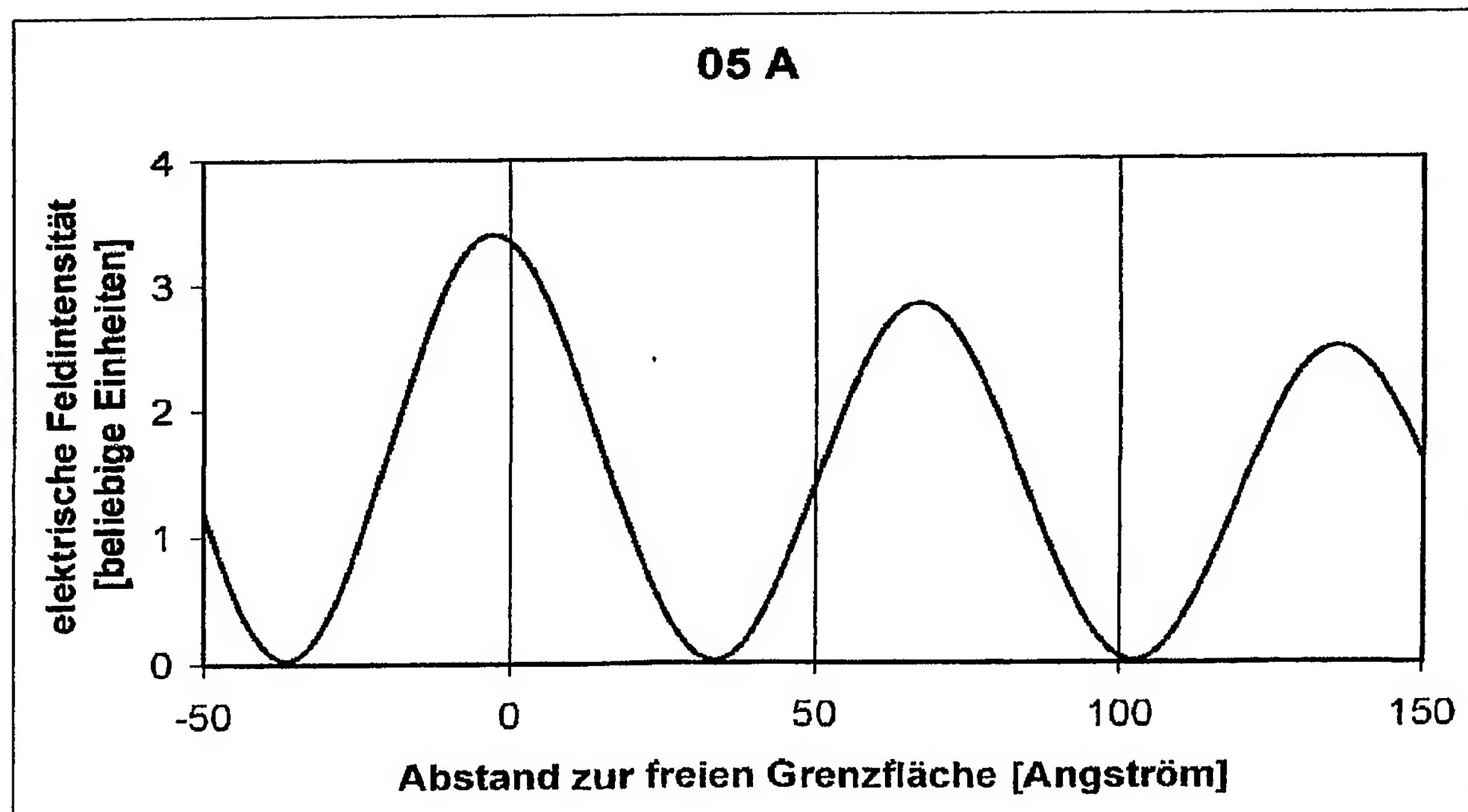
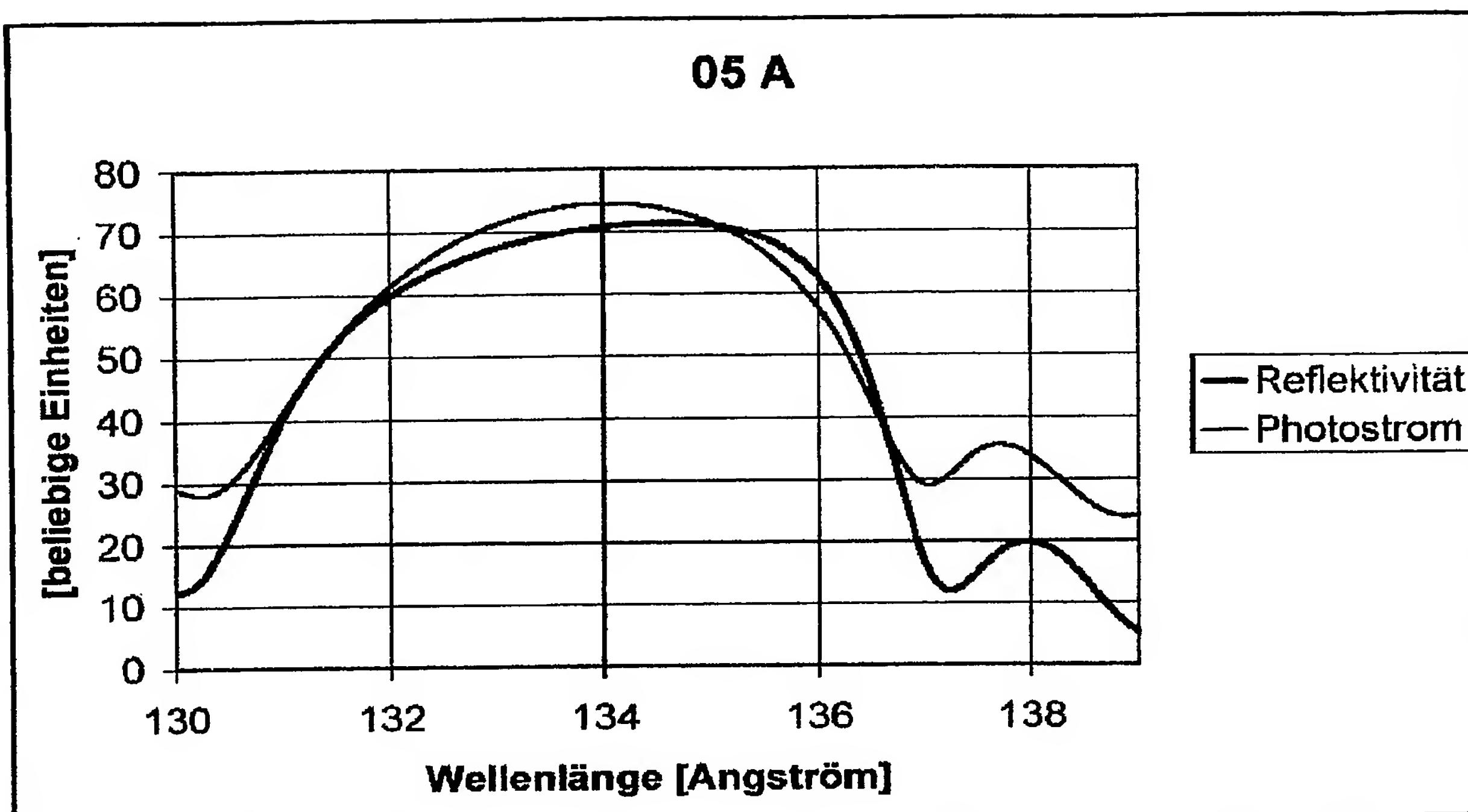
Figur 3c



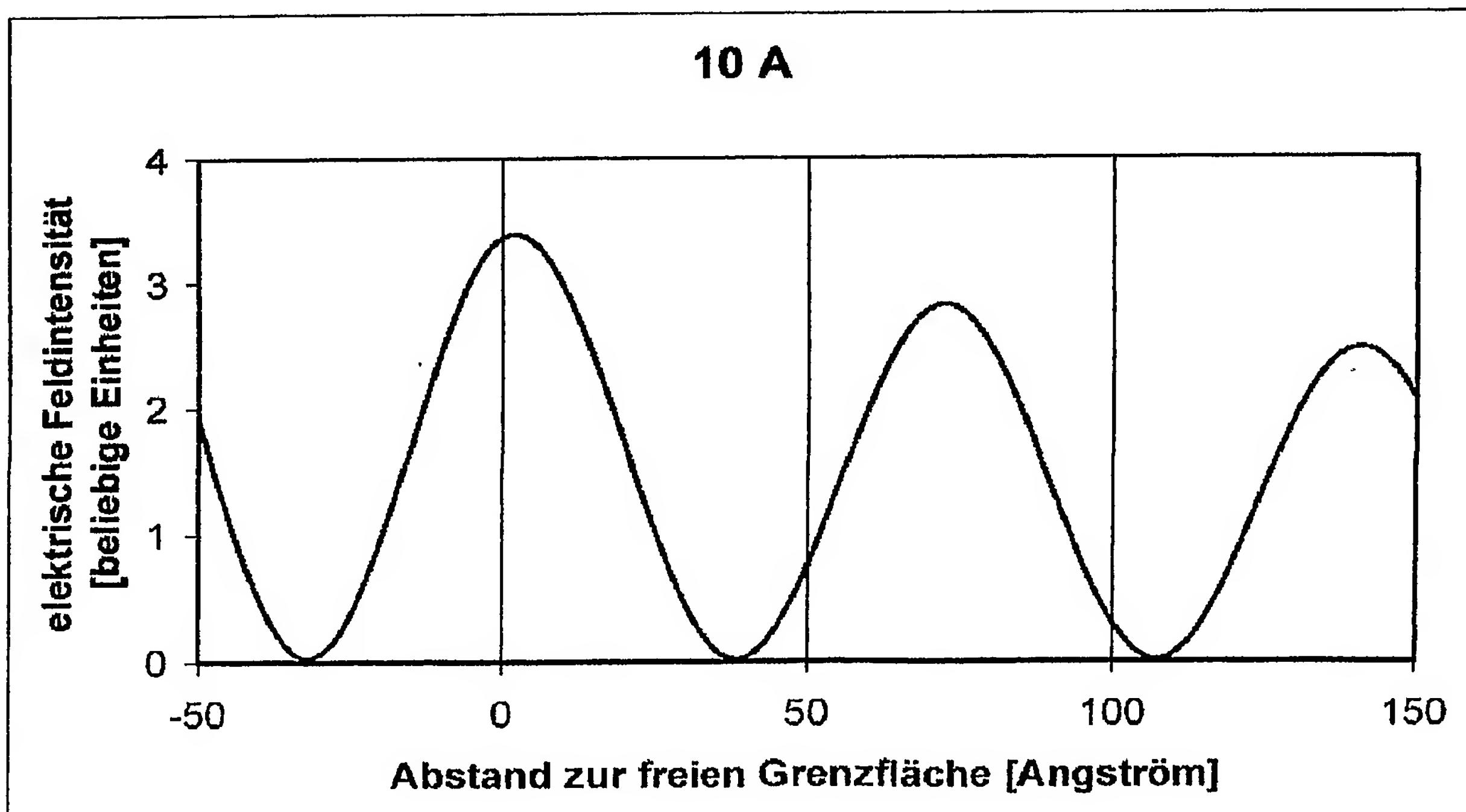
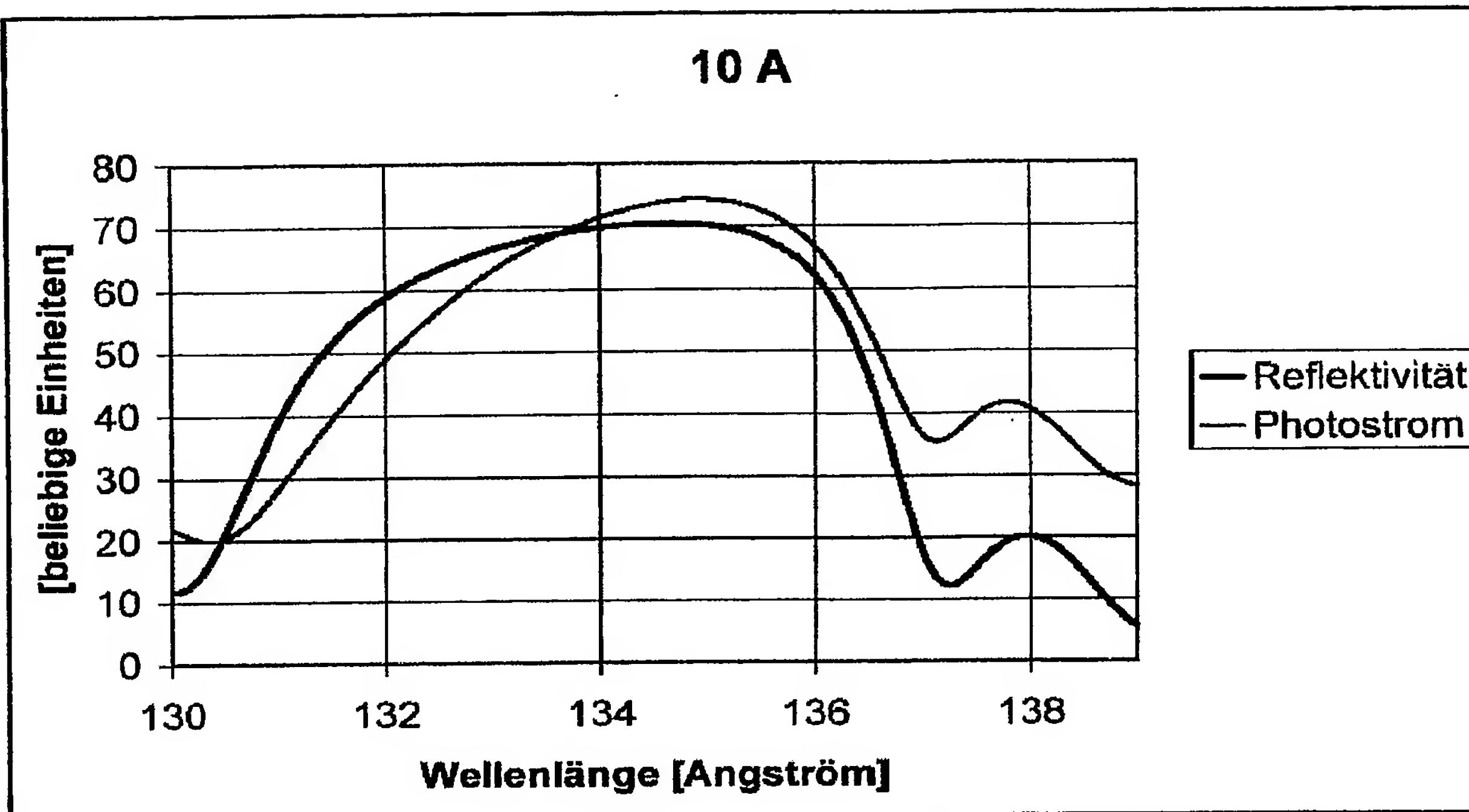
Figur 4a



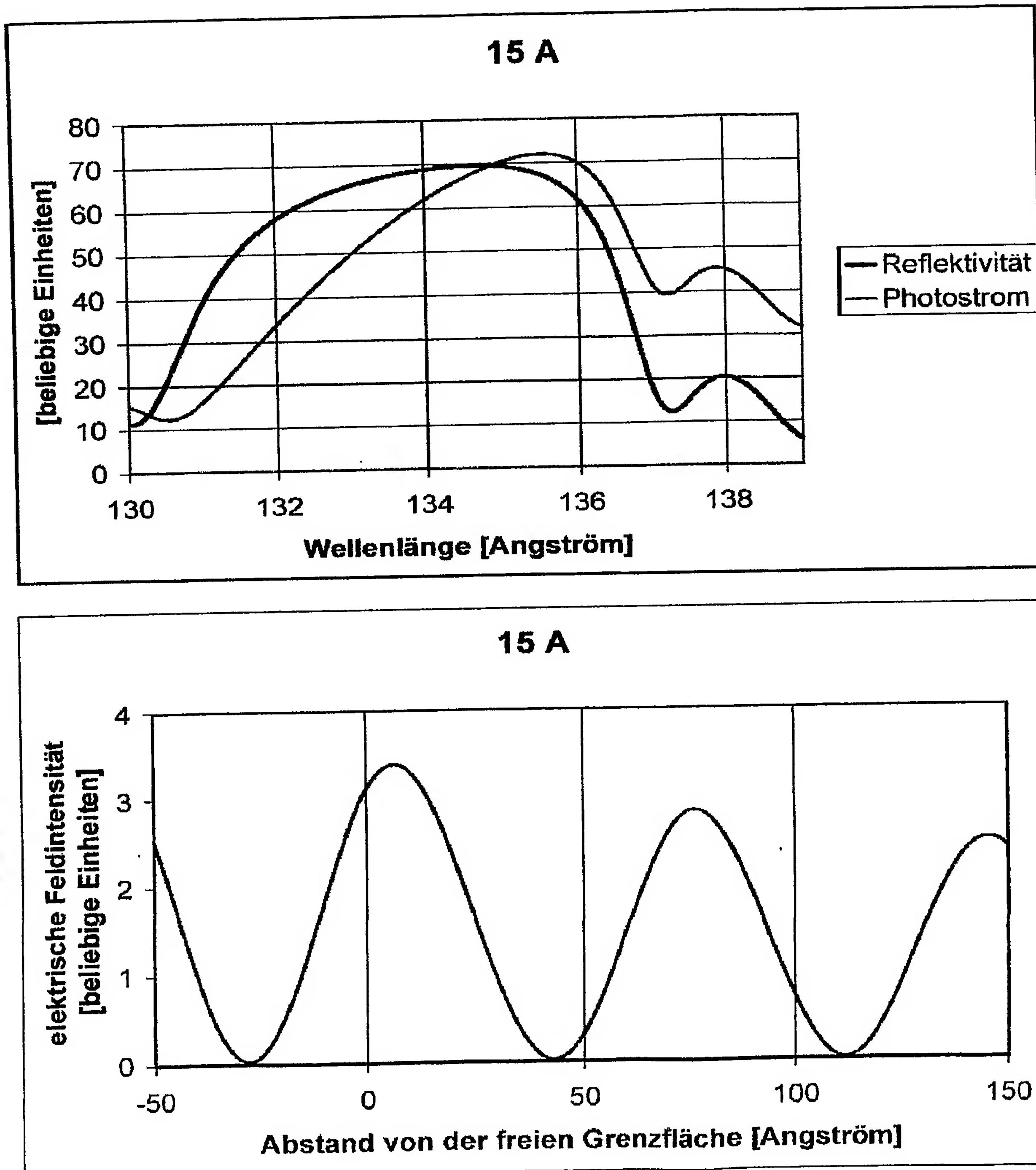
Figur 4b



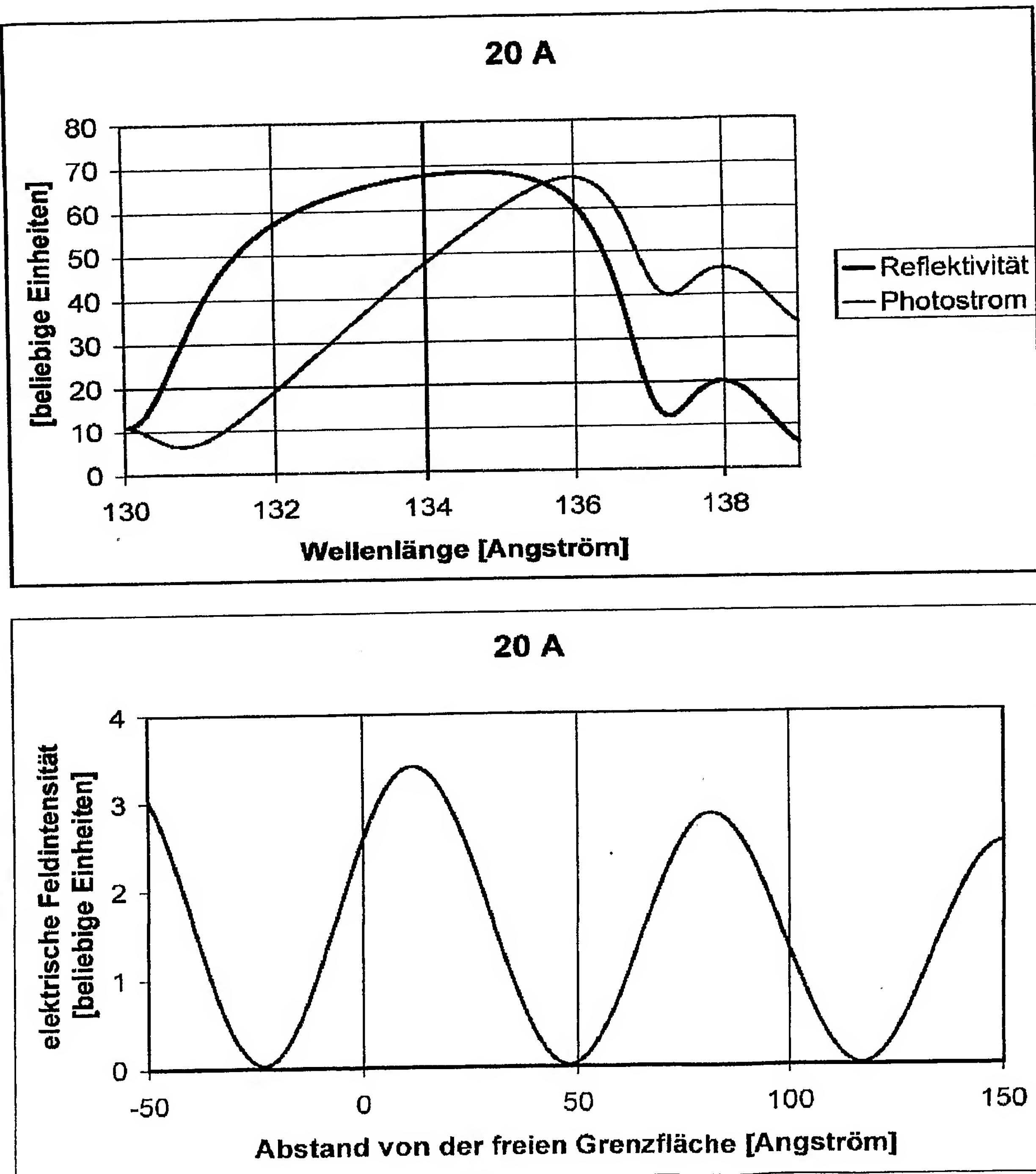
Figur 4c



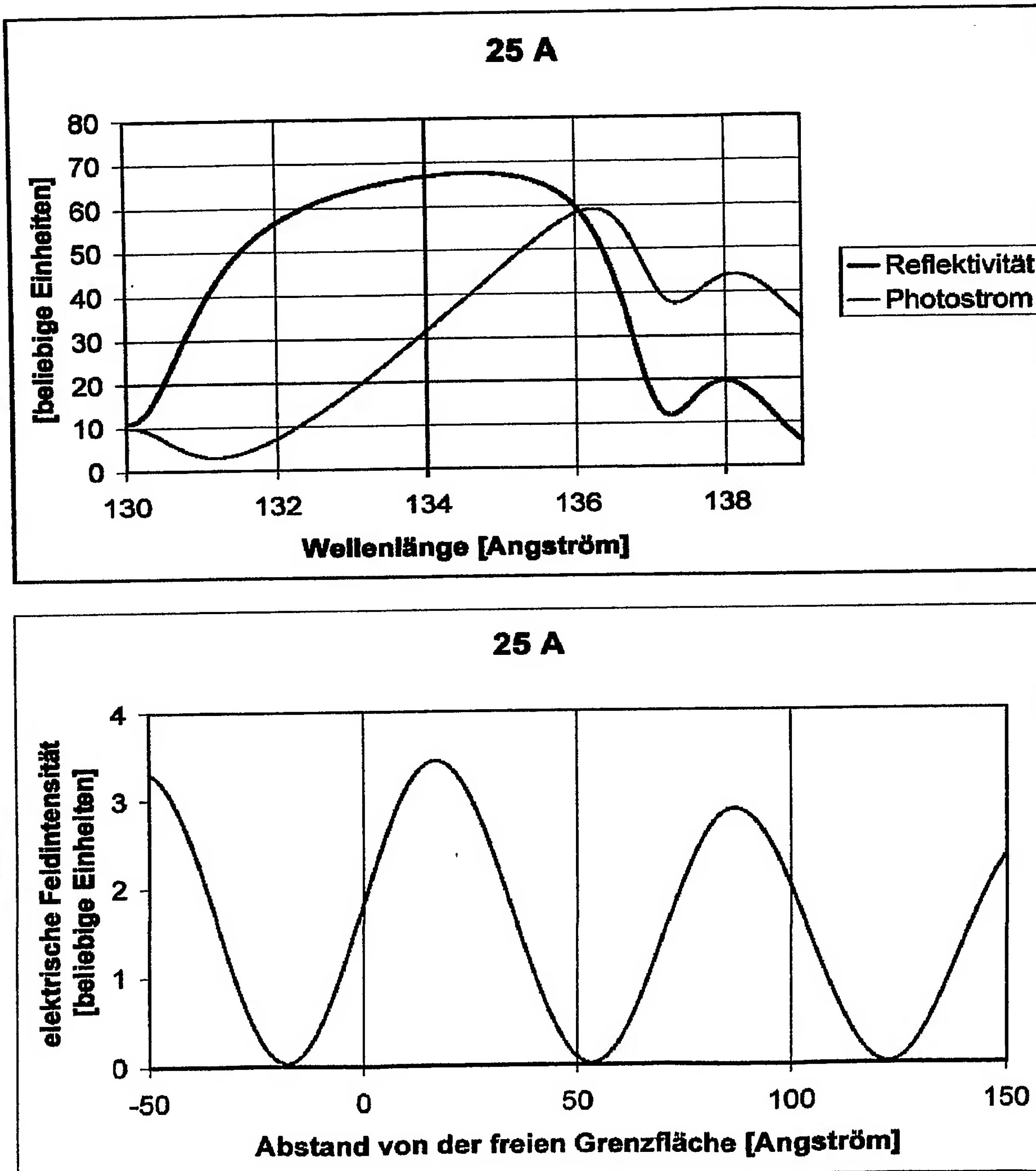
Figur 4d



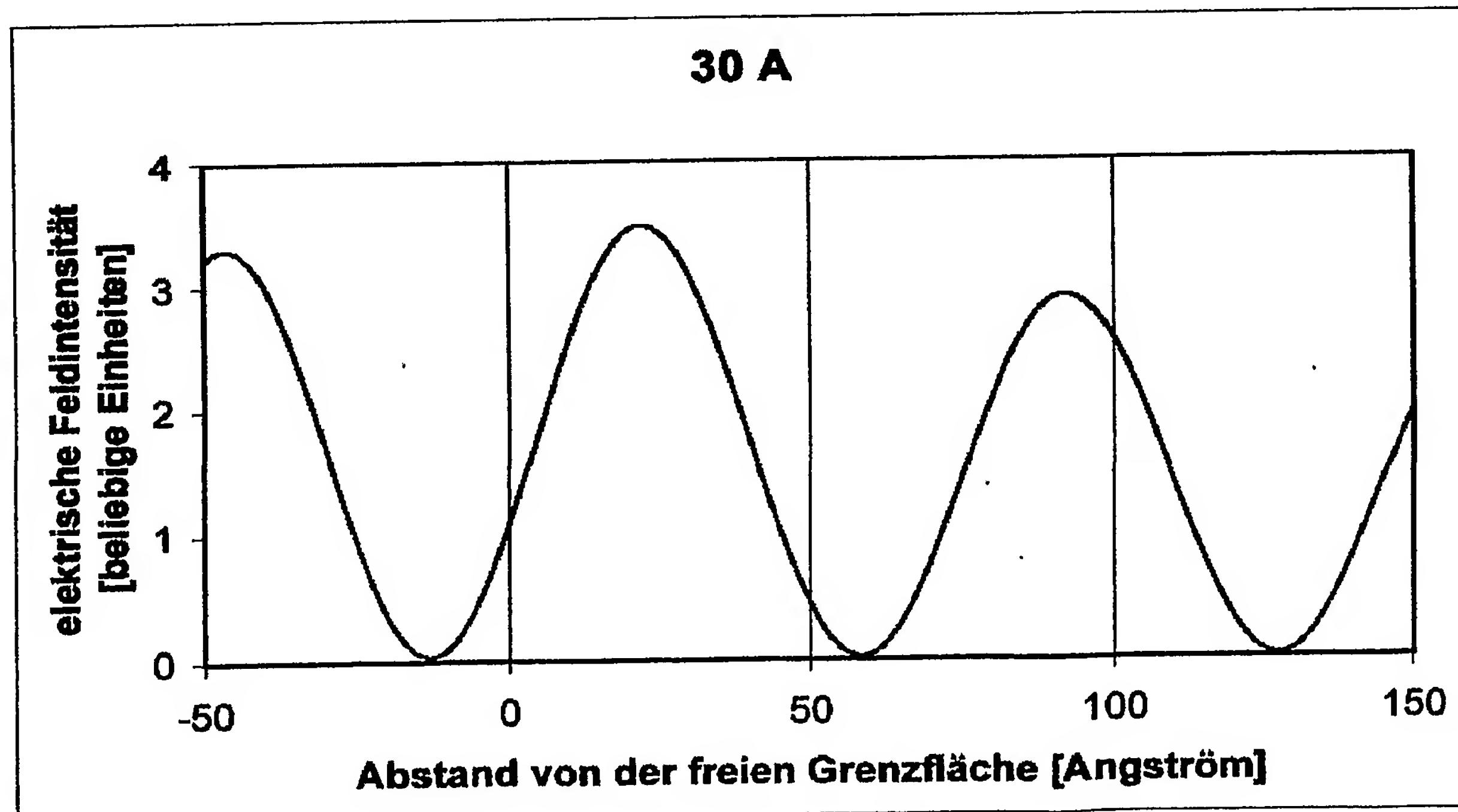
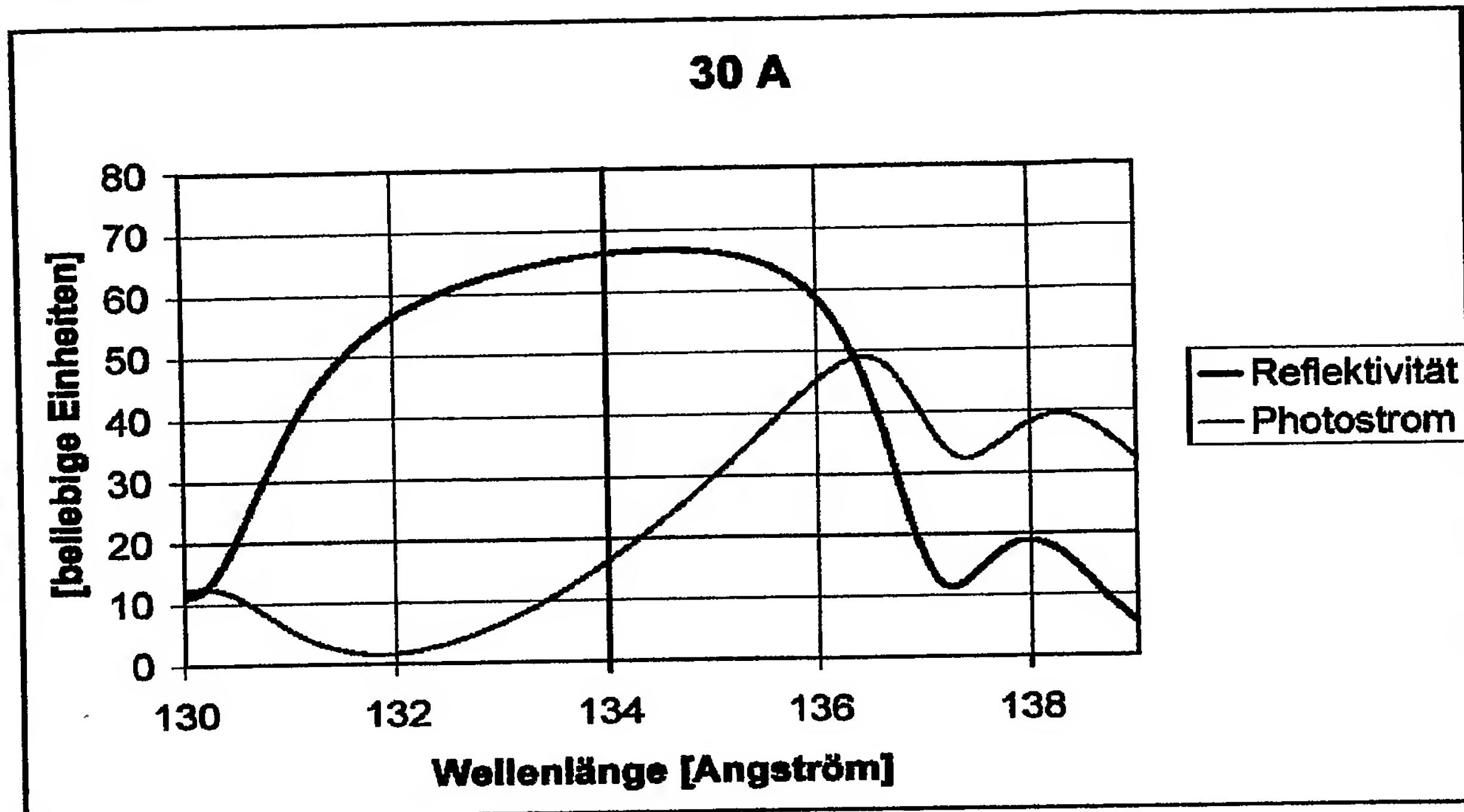
Figur 4e



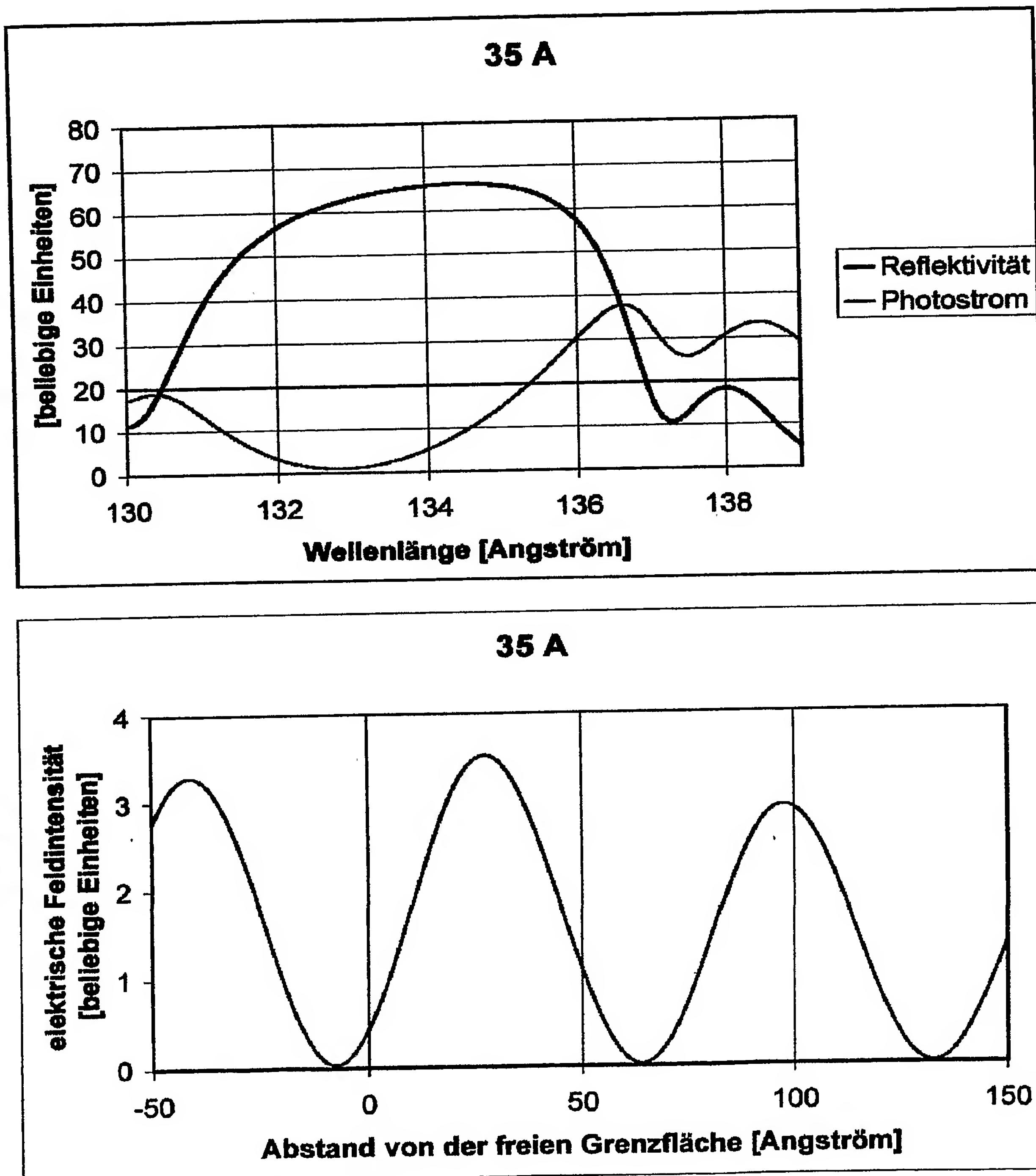
Figur 4f



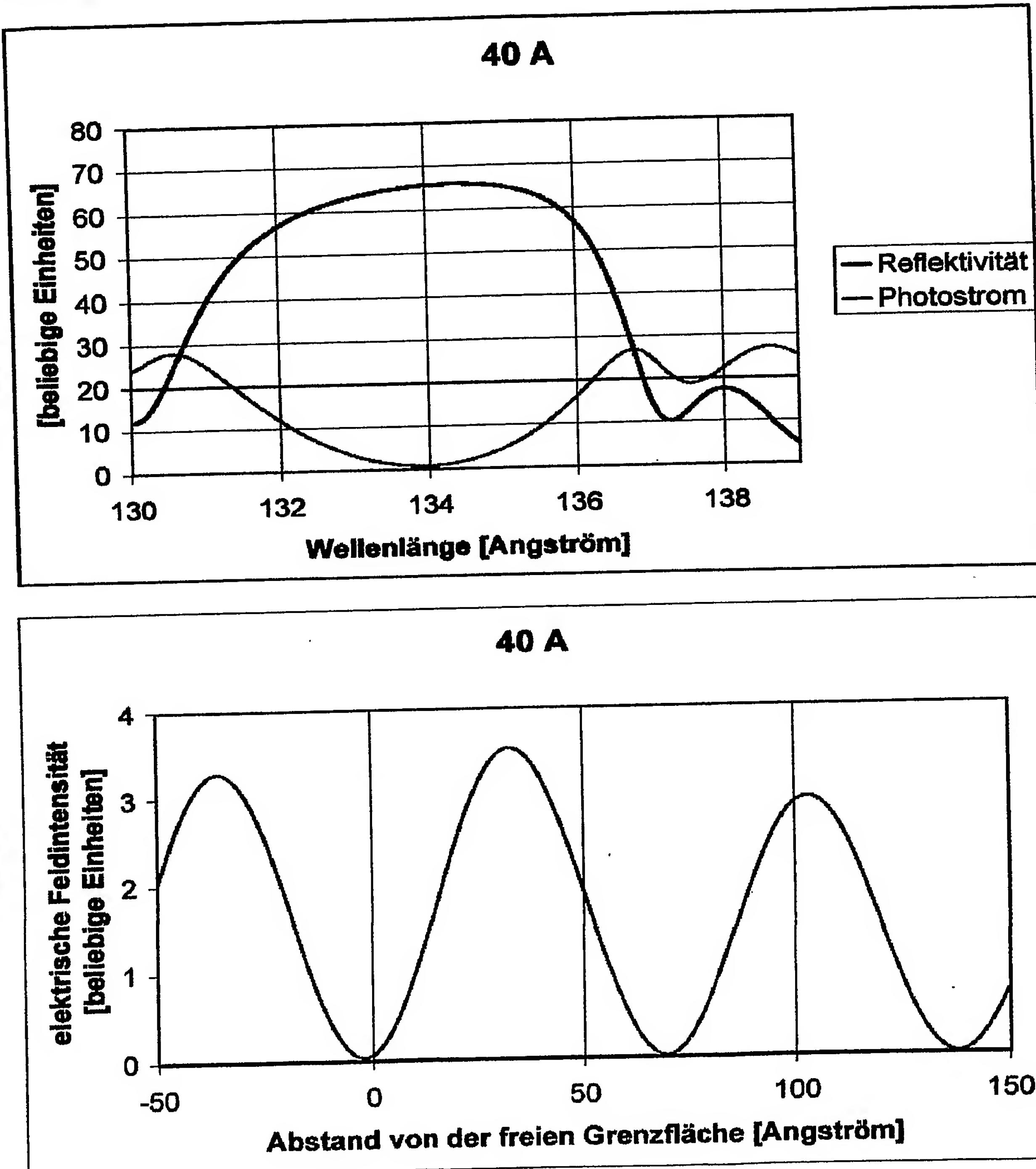
Figur 4g



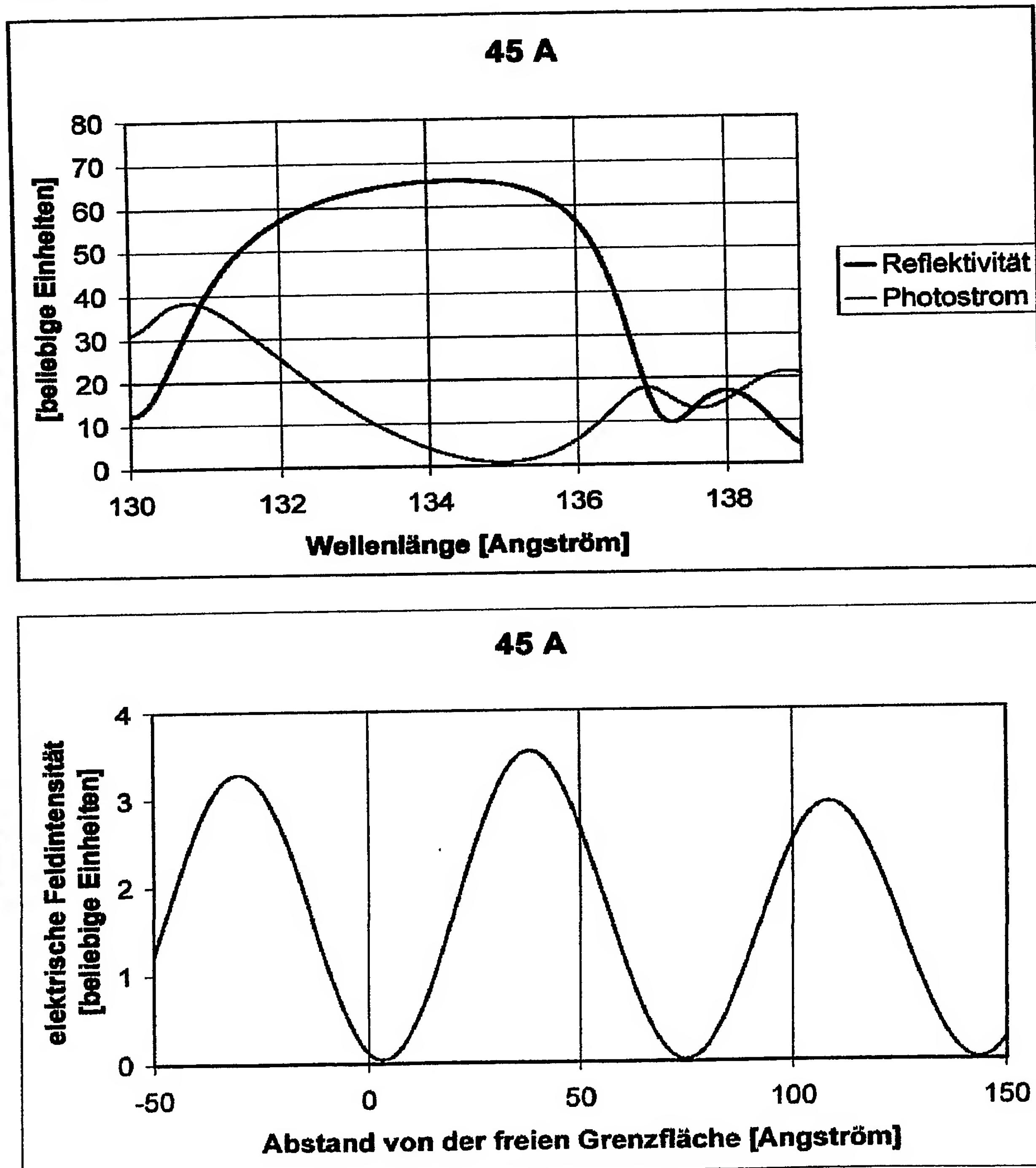
Figur 4h



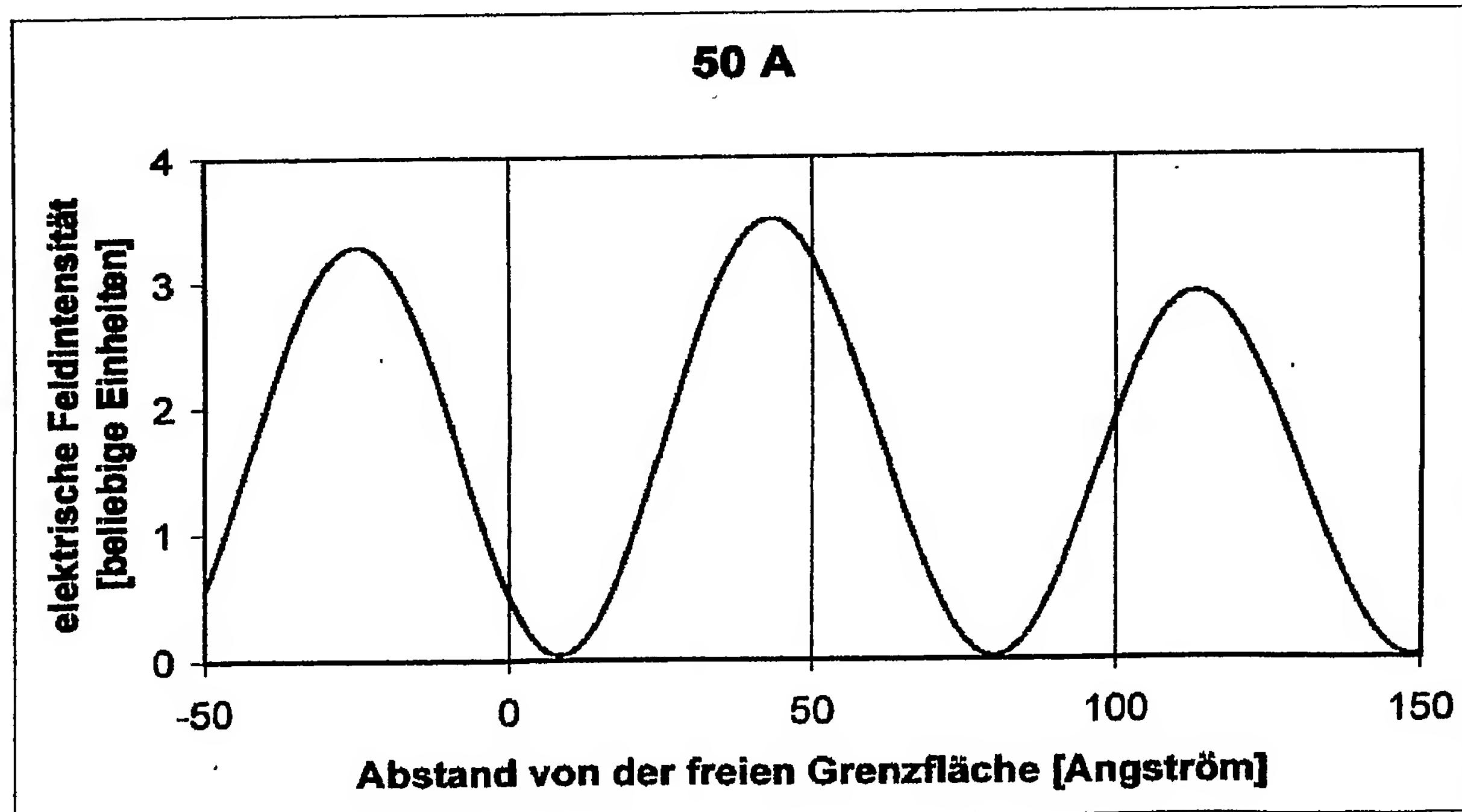
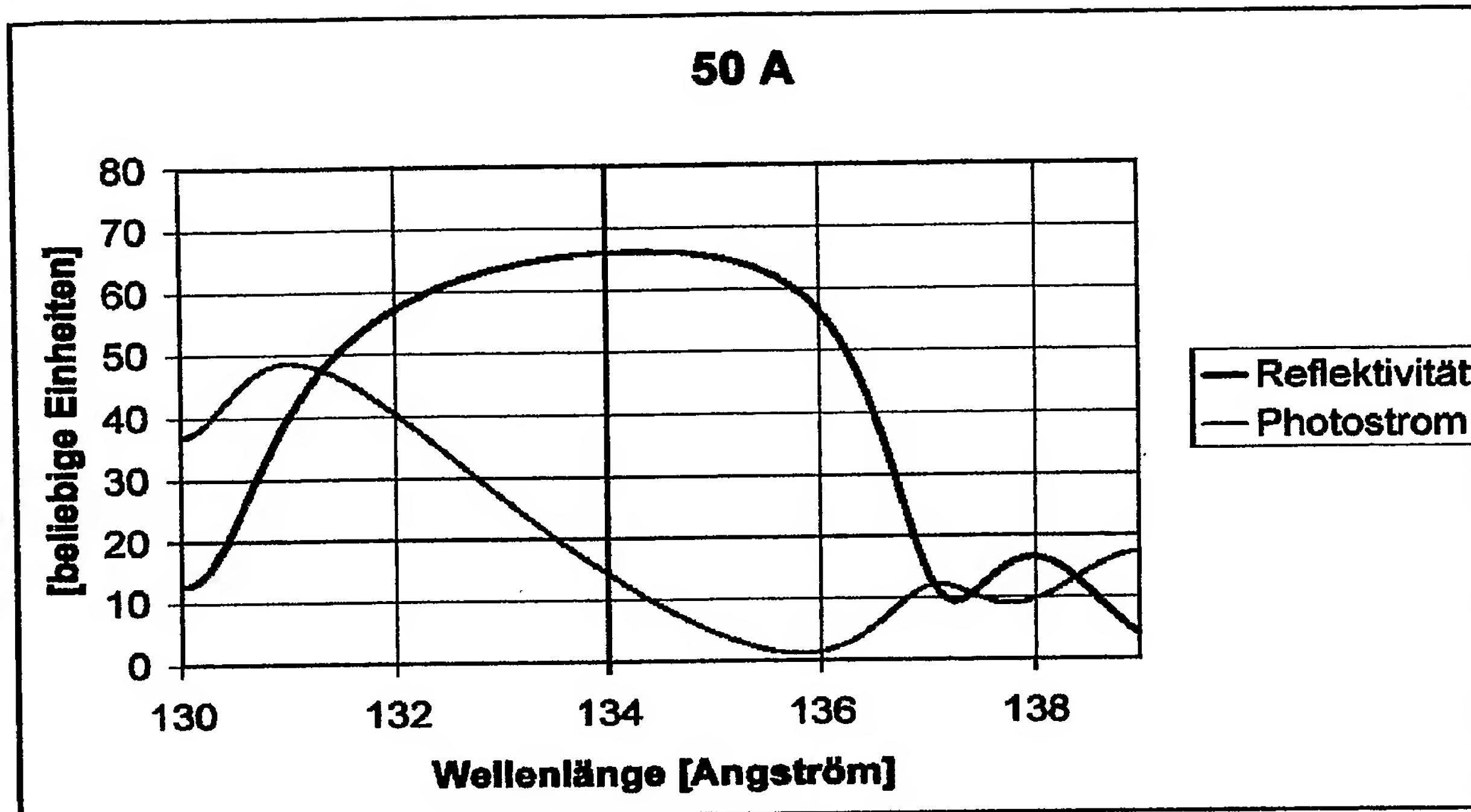
Figur 4i



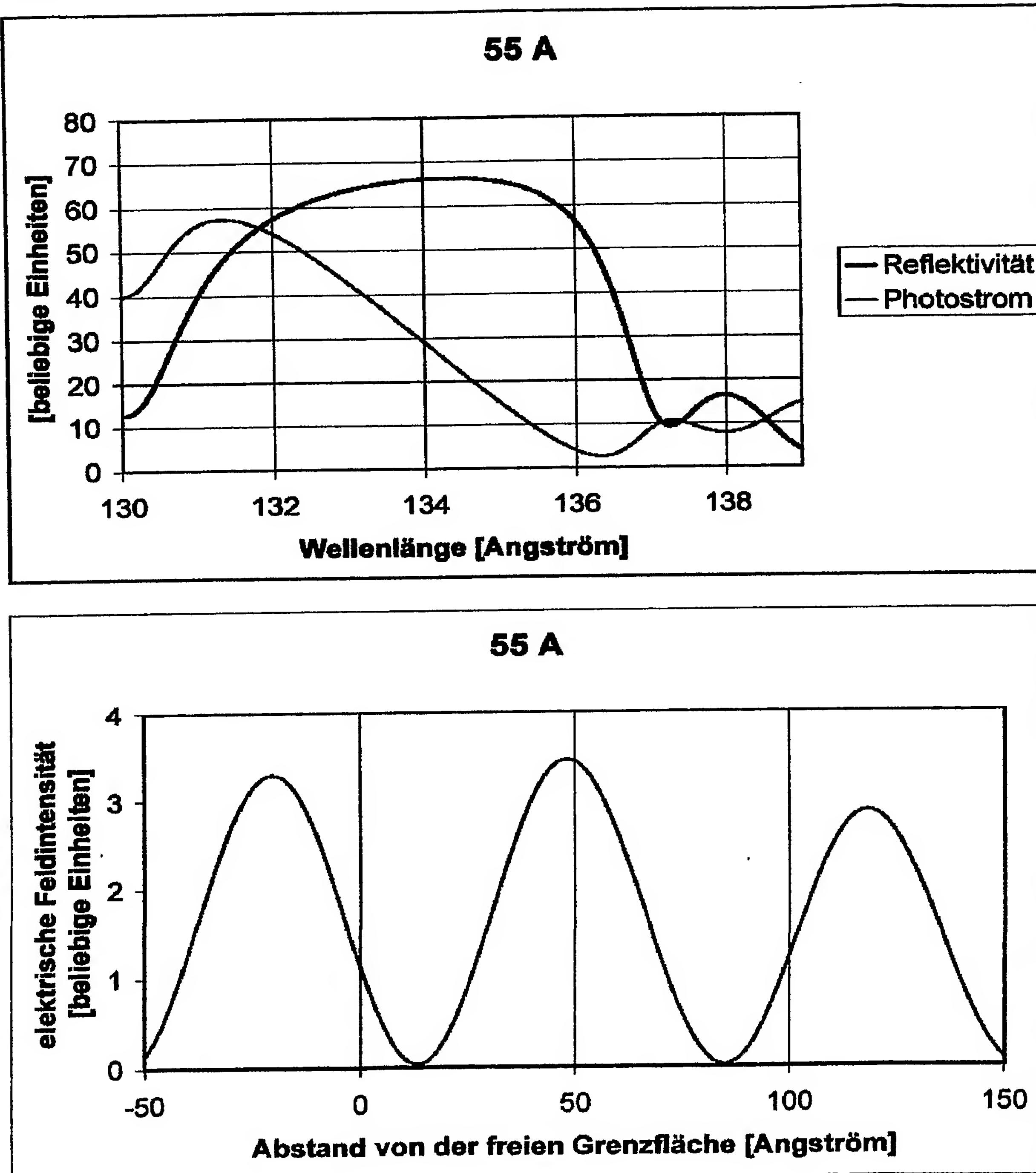
Figur 4j



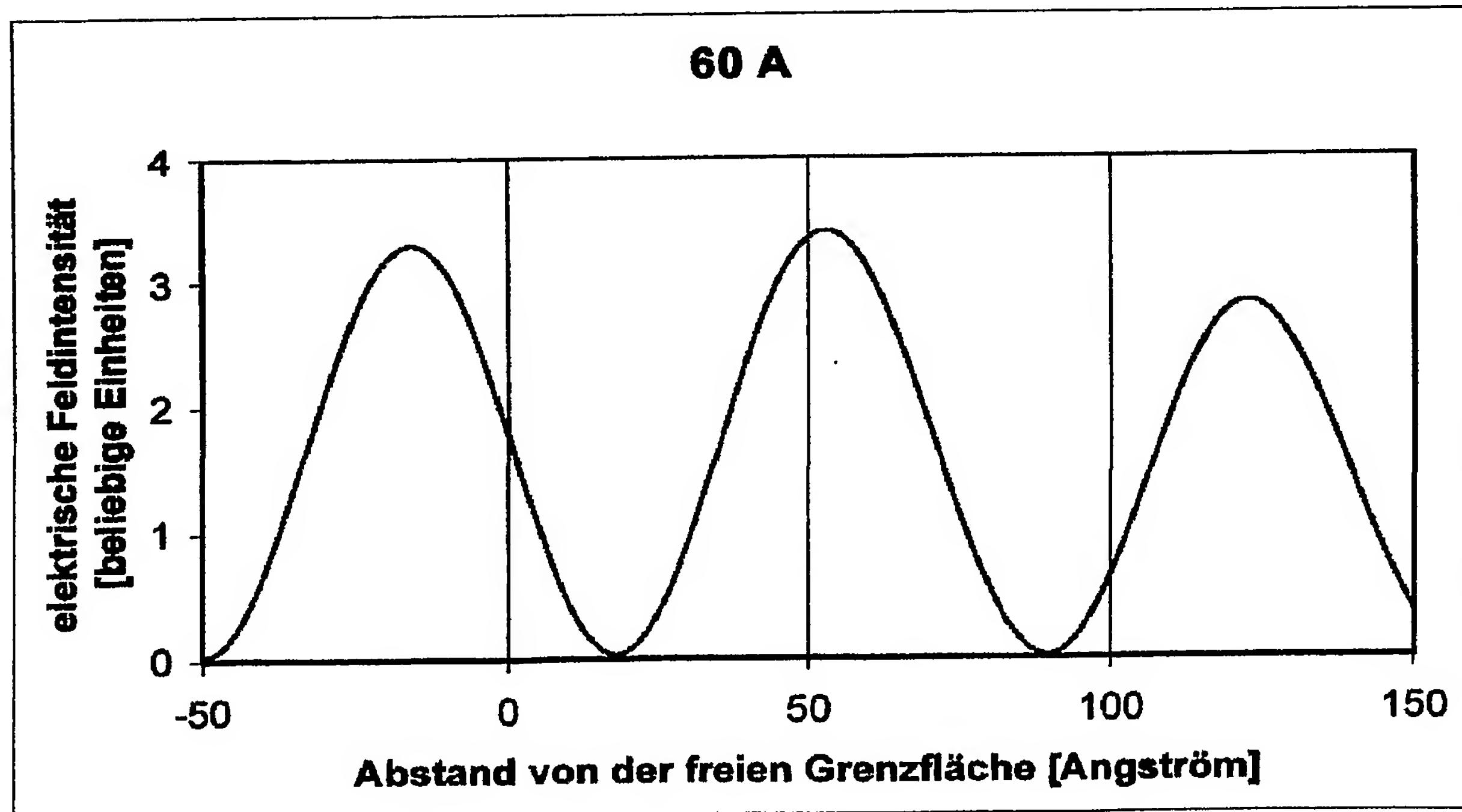
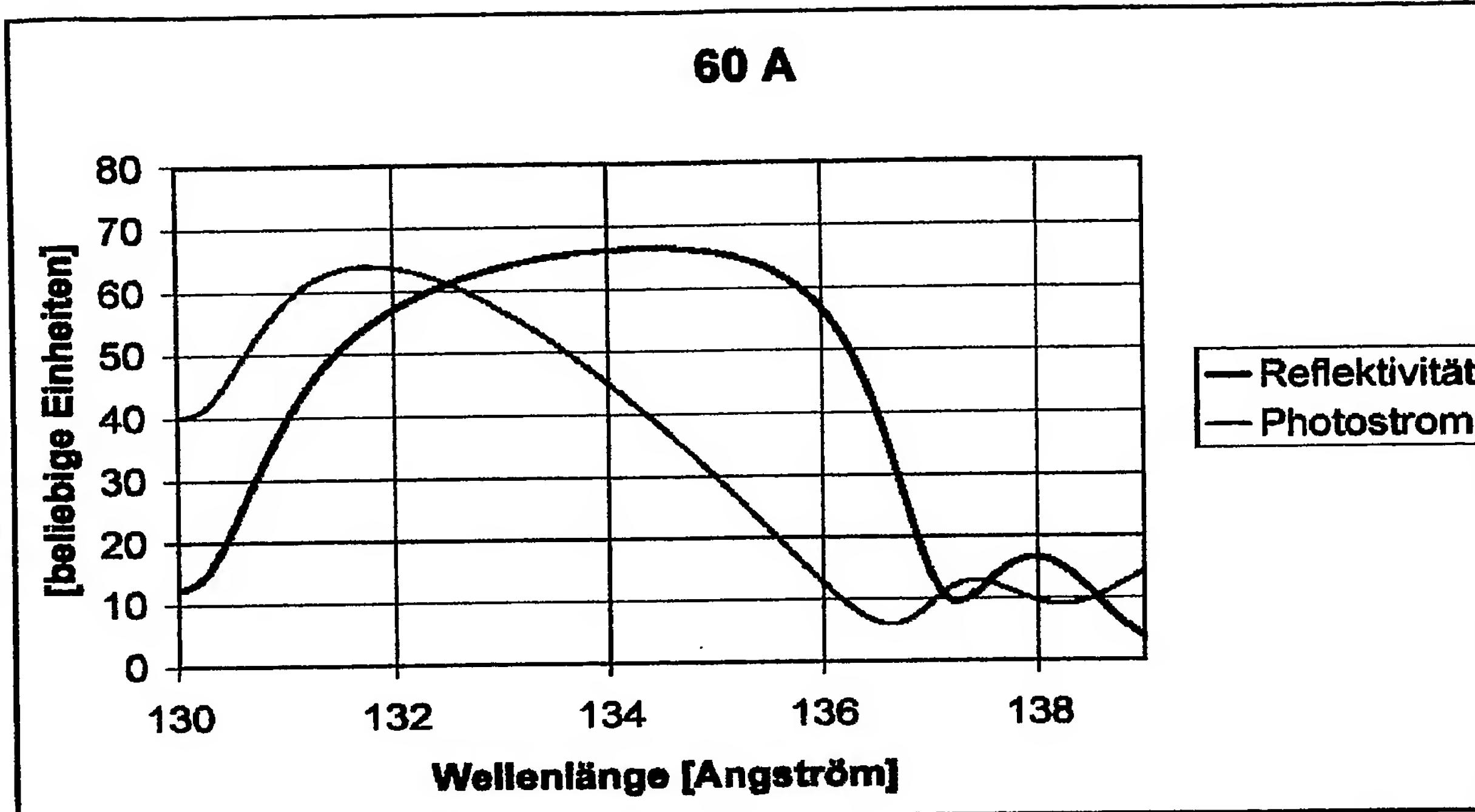
Figur 4k



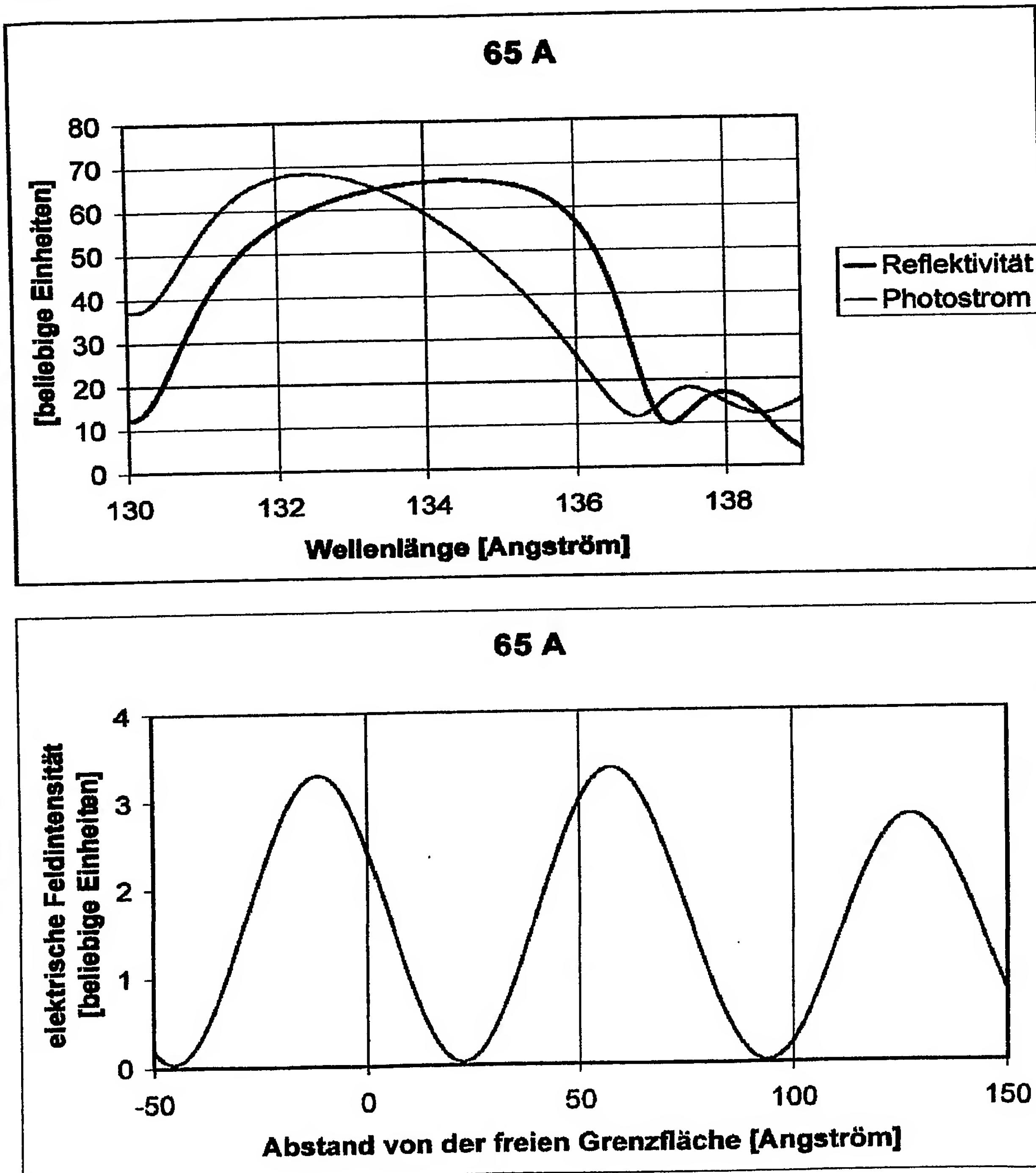
Figur 4



Figur 4m



Figur 4n



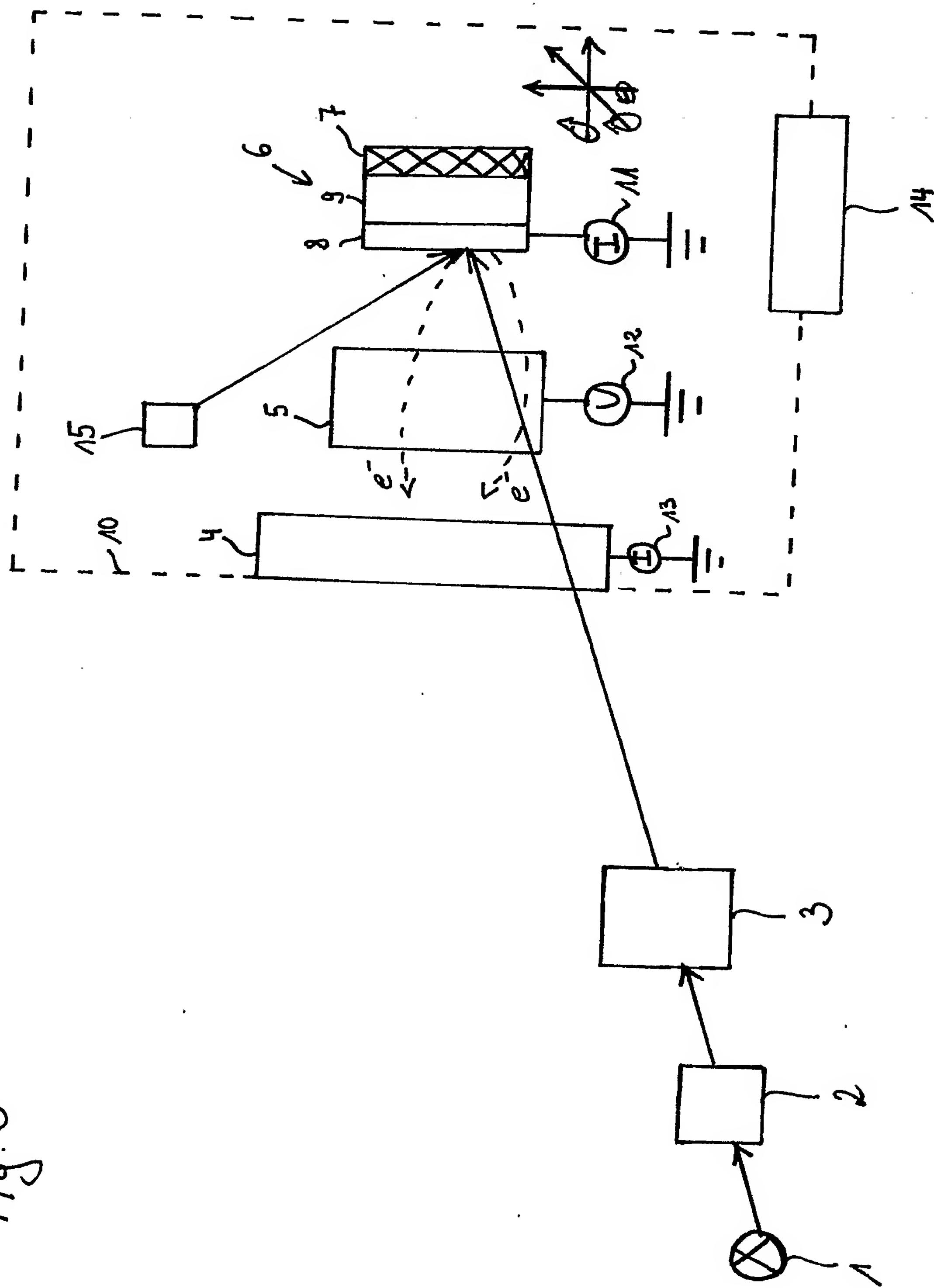


Fig. 5